

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.

MAUREN LUCILA MARQUES DE MORAIS MICALICHEN

USO DE DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVACIONAIS E DE REANÁLISE
PARA A ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DO VENTO NOS NÍVEIS DE
AEROGERADORES

CURITIBA

2018

MAUREN LUCILA MARQUES DE MORAIS MICALICHEN

USO DE DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVACIONAIS E DE REANÁLISE
PARA A ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DO VENTO NOS NÍVEIS DE
AEROGERADORES

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Nelson Luís da Costa Dias

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

M619u

Micalichen, Mauren Lucila Marques de Moraes

Uso de dados meteorológicos observacionais e de reanálise para a estimativa da velocidade do vento nos níveis de aerogeradores / Mauren Lucila Marques de Moraes Micalichen. – Curitiba, 2018.
83 p. : il. color. ; 30 cm.

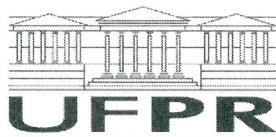
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, 2018.

Orientador: Nelson Luís da Costa Dias.

1. Energia eólica. 2. Velocidade do vento. 3. Reanálise. 4. Extrapolação vertical da velocidade do vento. 5. Estabilidade atmosférica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Dias, Nelson Luís da Costa. III. Título.

CDD: 621.312136

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR CIÊNCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MÉTODOS NUMÉRICOS
EM ENGENHARIA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MAUREN LUCILA MARQUES DE MORAIS MICALICHEN** intitulada: **USO DE DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVACIONAIS E DE REANÁLISE PARA A ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DO VENTO NOS NÍVEIS DE AEROGERADORES**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 27 de Março de 2018.

NL Dias

NELSON LUÍS DA COSTA DIAS

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

RICARDO CARVALHO DE ALMEIDA

Avaliador Interno (UFPR)

POR VIDEO CONFERÊNCIA

ROBERTO FERNANDO DA FONSECA LYRA

Avaliador Externo (UFAL)

PAULO JUSTINIANO RIBEIRO JÚNIOR

Avaliador Interno (UFPR)

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha mãe Joceli pelo apoio incondicional e incentivo em todos os momentos. Também agradeço ao meu esposo Luis Fernando, o qual sempre me apoiou, me animou e suportou meus momentos de tensão com carinho e dedicação. Obrigada por compreenderem minha ausência durante alguns períodos desta caminhada.

Agradeço aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE) Bruno Rutyna, Diego Metz, Igor Corazza, Inajara Rutyna, Ivan Guiramães, Lucas Lamy, Maicon Malacarne, Michely de Oliveira e Nicole Rozin que me acompanharam nessa jornada. Agradeço também a minha amiga Aline Leichtfeld que mesmo distante fisicamente, sempre se fez presente. A vocês agradeço por todas as contribuições pessoais e profissionais, pelos momentos de descontração e companheirismo.

Agradeço a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) por ter gentilmente cedido parte dos dados utilizados neste trabalho.

Também agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de mestrado através do projeto APQ-03813-12.

Agradeço aos professores Dr. Paulo Justiniano, Dr. Ricardo Almeida e Dr. Roberto Lyra pela disponibilidade e colaboração. É uma honra ser avaliada por esses excelentes profissionais.

Por fim, agradeço especialmente ao meu orientador Nelson Dias, o qual admiro e respeito; agradeço por sempre ter sido exigente, por ter acreditado que eu teria capacidade para desenvolver este trabalho, pela sua paciência, disponibilidade e ajuda sempre que necessitei. Obrigada por me guiar neste mundo de conhecimentos outrora desconhecido por mim.

Meus sinceros agradecimentos a todos.

Epígrafe

“O pessimista se queixa do vento, o otimista espera que ele mude e o realista ajusta as velas.”

— WILLIAM GEORGE WARD

RESUMO

O Brasil apresenta um expressivo crescimento na utilização de fontes de energia eólica, cuja avaliação do potencial eólico depende de boa disponibilidade de dados observacionais para o cálculo de estatísticas, assim como de boas metodologias para estimar a velocidade do vento a 50 m (ou mais) acima do solo, uma vez que a maioria das redes de observações meteorológicas medem o vento a 10 m de altura. Com isso, o objetivo do presente trabalho é fazer uma investigação de boas técnicas de extrapolação da velocidade vertical do vento para alturas superiores a 10 m. Com as séries de dados de reanálise do modelo *Climate Forecast System Version 2* (CFSV2) vindas dos *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) e com dados medidos em uma torre localizada em Minas Gerais, foi possível estimar a velocidade do vento em níveis superiores a 10 m. Foram estimados valores do comprimento de rugosidade para o uso na previsão da velocidade do vento e o que produziu melhores resultados para o local da torre citada foi $z_0 = 0,15$ m. Para estimar a velocidade do vento foram analisados três modelos, um deles é o perfil logarítmico e os outros dois utilizam funções de correção de estabilidade atmosférica. As estimativas de velocidade do vento geradas com a utilização de cada um desses modelos de previsão foram comparadas com a velocidade do vento observada na torre meteorológica estudada. Os resultados dos índices estatísticos mostram que a estimativa da velocidade do vento para a altura de 50 metros com o uso perfil logarítmico gerou uma raiz do erro quadrático médio (REQM) de $3,22 \text{ m s}^{-1}$ para todo o conjunto de dados e um coeficiente de correlação de 0,30. A melhor estimativa com função de estabilidade gerou uma REQM de $2,18 \text{ m s}^{-1}$ para todo o conjunto de dados e um coeficiente de correlação de 0,64. Além disso, foi feita uma comparação entre os três métodos de estimativa de velocidade do vento utilizados, o que evidenciou a importância de utilizar funções de correção de estabilidade para reduzir os erros na previsão da velocidade do vento.

Palavras-chave: Energia eólica, velocidade do vento, reanálise, extrapolação vertical da velocidade do vento, estabilidade atmosférica.

ABSTRACT

Brazil presents a significant growth in the use of wind energy sources, which evaluation of the wind potential depends on the availability of observational data for the calculation of statistics, as well as good methodologies to estimate the wind speed at 50 m (or more) above ground, since most of the meteorological observations networks measure the wind at a height of 10 m. With this, the objective of the present work is to do an investigation of good techniques of extrapolation of the vertical velocity of the wind to heights superior to 10 m. With the series of reanalysis data of the Climate Forecast System Version 2 (CFSV2) model coming from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) and with data measured in a tower located in Minas Gerais, it was possible to estimate the wind speed at levels higher than 10 m. Roughness length values were estimated for use in wind speed prediction and the one that produced the best results for the site of the cited tower was $z_0 = 0,15$ m. In order to estimate wind speed, three models were analyzed, one being the logarithmic profile and the other two using atmospheric stability correction functions. The wind speed estimates generated with the use of each of these forecast models were compared with the wind speed observed in the meteorological tower studied. The results of the statistical indices show that the estimate of the wind speed for the height of 50 meters with the use logarithmic profile generated a root mean square error (RMSE) of $3,22 \text{ m s}^{-1}$ for the entire data set and a correlation coefficient of 0,30. The best estimate with stability function generated a RMSE of $2,18 \text{ m s}^{-1}$ for the entire data set and a correlation coefficient of 0,64. In addition, a comparison was made among the three wind speed estimation methods used, which evidenced the importance of using stability correction functions to reduce errors in wind speed prediction.

Keywords: Wind energy, wind speed, reanalysis, wind speed vertical extrapolation, atmospheric stability.

Lista de Figuras

3.1	Mapa contendo a localização das 17 estações selecionadas.	32
3.2	Comparação entre séries temporais de temperatura do ar para a estação 1031 — Reanálise <i>versus</i> Cemig: (a) Período de 01 a 14 de janeiro de 2009; (b) Período de 01 a 14 de julho de 2009.	33
3.3	Comparação entre séries temporais de velocidade do vento para a estação 1031 — Reanálise <i>versus</i> Cemig: (a) Período de 01 a 14 de janeiro de 2009; (b) Período de 01 a 14 de julho de 2009.	33
3.4	Comparação entre séries temporais de temperatura do ar para a estação 1031 — Período de 01 a 14 de janeiro de 2009: (a) Reanálise <i>versus</i> Cemig; (b) Reanálise <i>versus</i> Médias móveis de 3h para os dados da rede Cemig; (c) Reanálise <i>versus</i> Médias móveis de 5h para os dados da rede Cemig.	42
3.5	Comparação entre séries temporais de velocidade do vento para a estação 1031 — Período de 01 a 14 de janeiro de 2009: (a) Reanálise <i>versus</i> Cemig; (b) Reanálise <i>versus</i> Médias móveis de 3h para os dados da rede Cemig; (c) Reanálise <i>versus</i> Médias móveis de 5h para os dados da rede Cemig.	43
4.1	Uma comparação entre as funções de estabilidade sugeridas por Businger-Dyer e Cheng-Brutsaert	46
4.2	Vista do local de instalação da TORRE P1 em Minas Gerais	48
4.3	Alguns exemplos de perfis de velocidade do vento na forma padrão	49
4.4	Alguns exemplos de perfis de velocidade do vento fora do padrão esperado	50
4.5	EMA e REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso de diferentes comprimentos de rugosidade — ESTUDO 1	53

4.6	Estimativa da velocidade do vento para 50 m de altura (ESTUDO 1): (a) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).	55
4.7	Estimativa da velocidade do vento para 50 m a partir do conhecimento da velocidade do vento a 10 m de altura (ESTUDO 2 — parte 1): (a) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).	57
4.8	Estimativa da velocidade do vento para 50 m a partir do conhecimento da velocidade do vento a 10 m de altura (ESTUDO 2 — parte 2): (a) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável).	59
4.9	EMA e REQm da estimativa de velocidade do vento com o uso de diferentes comprimentos de rugosidade — ESTUDO 3	62

4.10	Estimativa da velocidade do vento para 50 m de altura (ESTUDO 3): (a) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).	63
4.11	Comparação mensal da REQM na estimativa da velocidade do vento — O ESTUDO 1 utiliza a equação do perfil logarítmico (Equação (2.11); O ESTUDO 2 utiliza a Equação (2.18); O ESTUDO 3 utiliza a Equação (2.15).	66
4.12	Comparação sazonal da REQM na estimativa da velocidade do vento — O ESTUDO 1 utiliza a equação do perfil logarítmico (Equação (2.11); O ESTUDO 2 utiliza a Equação (2.18); O ESTUDO 3 utiliza a Equação (2.15).	67
4.13	EMA e REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso de diferentes comprimentos de rugosidade	69
4.14	Estimativa da velocidade do vento para 100 m de altura: (a) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) <i>boxplots</i> dos dados observados <i>versus</i> dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).	71
A.1	Comparação entre as REQMs obtidas nas estimativas de velocidade do vento	80

Lista de Siglas e Abreviaturas

CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CFSV2	<i>Climate Forecast System Version 2</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
EMA	Erro Médio Absoluto
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
PPGMNE	Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
TSMO	Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov
VAR	Variância

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos Minúsculos

c_p	Calor específico à pressão constante
$c_{x_s x_o}$	Covariância entre os pares de dados x_s e x_o
g	Aceleração da gravidade
$g/\bar{\theta}$	Parâmetro de flutuabilidade
k	Constante de von Kármán
n	Número total de dados da amostra
$p(x, t)$	Processo p que depende do espaço e do tempo
\bar{p}	Média de uma variável p
p'	Flutuação turbulenta da variável p
r	Coefficiente de correlação
s_{x_s}	Desvio padrão dos dados estimados
s_{x_o}	Desvio padrão dos dados observacionais
u	Componente horizontal da velocidade do vento
\bar{u}_i	Velocidade média do vento na altura i acima da superfície ($i > 0$)
\bar{u}_{i+h}	Velocidade média do vento na altura $i + h$ acima da superfície, com $h > 0$
u_*	Velocidade de atrito
u'	Flutuação turbulenta da variável u
$\overline{u'}$	Valor médio da flutuação turbulenta da variável u
$\overline{u + v}$	Média da soma das componentes u e v da velocidade do vento

\overline{uw}	Média do produto das componentes u e w da velocidade do vento
x_s	Dado estimado
x_o	Dado observado
x_i	Valor do dado na posição i
\bar{x}	Média dos dados x_i
\overline{w}	Componente vertical da velocidade do vento
$\overline{w'u'}$	Covariância entre as componentes w e u da velocidade do vento
$\overline{w'\theta'}$	Covariância entre a componente w da velocidade do vento e a temperatura potencial θ
z	Altura acima da superfície
z_0	Comprimento de rugosidade da superfície
z_i	Altura i acima da superfície ($i > 0$)
z_{i+h}	Altura $i + h$ acima da superfície, com $h > 0$

Símbolos Romanos Maiúsculos

H	Fluxo de calor sensível na superfície
L	Comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov
Q_1	Primeiro quartil
Q_2	Segundo quartil
Q_3	Terceiro quartil

Símbolos Gregos Minúsculos

ζ	Variável adimensional de estabilidade de Monin-Obukhov
ζ_i	Variável adimensional de estabilidade de Monin-Obukhov na altura i
ζ_{i+h}	Variável adimensional de estabilidade de Monin-Obukhov na altura $i + h$
θ	Temperatura potencial

$\bar{\theta}$	Temperatura potencial média
θ_*	Escala turbulenta de temperatura
$\bar{\rho}$	Densidade média do ar
τ	Tensão de cisalhamento na superfície
τ_x	Tensão superficial na direção da componente u do vetor velocidade do vento
τ_y	Tensão superficial na direção da componente v do vetor velocidade do vento
ϕ_τ	Função adimensional do gradiente de velocidade do vento

Símbolos Gregos Maiúsculos

Ψ	Função de estabilidade atmosférica
--------	------------------------------------

SUMÁRIO

1	Introdução	17
2	Conceitos fundamentais	21
2.1	Camada limite atmosférica	21
2.2	Médias e flutuações	22
2.3	Teoria de Similaridade e relações de perfis de velocidade do vento	23
2.4	Comprimento de rugosidade	25
2.5	Dados de reanálise	28
2.6	Descritores estatísticos de erros	29
3	Análise comparativa entre dados de reanálise e dados observacionais	31
3.1	Área de estudo e dados utilizados	32
3.2	Resultados e discussão	33
3.3	Análise comparativa entre dados de reanálise e dados observacionais — Médias móveis de 3h e 5h para os dados da rede Cemig	39
4	Avaliação de métodos de estimativas da velocidade do vento	44
4.1	Algumas formulações existentes da função de estabilidade atmosférica . .	44
4.2	Área de estudo e dados utilizados	47
4.3	Aplicação de técnicas para estimar o comprimento de rugosidade	48
4.4	Estimativa da velocidade do vento: ESTUDO 1 — Resultados e Discussão	52
4.5	Estimativa da velocidade do vento: ESTUDO 2 — Resultados e Discussão	56
4.6	Estimativa da velocidade do vento: ESTUDO 3 — Resultados e Discussão	61
4.7	Uma comparação entre os resultados de estimativas da velocidade do vento obtidos	65
4.8	Estimativa da velocidade do vento para a altura de 100 m	68
5	Conclusões e Recomendações	72
	REFERÊNCIAS	74

A	Justificativa para a escolha dos dados de velocidade do vento a 10 m de altura	78
B	Processamento de dados vindos da reanálise	81

Capítulo 1

Introdução

A geração de energia eólica expandiu-se no mundo de forma acelerada ao longo dos últimos anos. Segundo Amarante et al. (2001), o potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético tem sido objeto de estudo desde os anos 1970 com um histórico que revela um descortinamento progressivo de um potencial energético natural de relevante magnitude existente no país. Em 2017 o Brasil se tornou o oitavo país do mundo com maior capacidade instalada em usinas eólicas, com cerca de 12,8 gigawatts.

À medida que um país se desenvolve, aumenta a sua demanda por energia. Isso gera a necessidade de se encontrar fontes alternativas, preferencialmente ambientalmente corretas e, ao mesmo tempo, economicamente viáveis.

Para diversos estudos atmosféricos são necessários dados observacionais com boa qualidade e disponibilidade. Segundo Martins et al. (2008), muitas vezes dados locais não estão disponíveis devido aos custos de instalação e manutenção da infraestrutura necessária para a coleta dos dados. Outro aspecto a ser considerado está relacionado com a disponibilidade de um histórico de dados. Em alguns casos, existem poucas estações meteorológicas na região de interesse; em outros, as séries históricas possuem um grande número de falhas de medição. Assim, uma das grandes dificuldades para a realização de estudos com dados meteorológicos ainda é a baixa quantidade e a má qualidade das informações disponíveis.

Uma alternativa é o uso de uma base de dados em escala regional ou global. Alguns centros de previsão do tempo e clima disponibilizam produtos de reanálise, que consistem em bases de dados de variáveis meteorológicas. Essas bases de dados contemplam um conjunto homogêneo de dados para um longo período (uma década ou mais), e são preparadas com o uso de modelos numéricos de previsão do tempo alimentados com dados coletados em estações sinóticas, boias oceânicas, radiossondas, satélites e embarcações. Outro aspecto importante é que as bases de dados de reanálise não apresentam falhas, isto é, os dados estão disponíveis em todo o período de tempo englobado pelo projeto (Martins et al., 2008).

Porém, esses bancos de dados podem apresentar discrepâncias quando comparados

com alguma fonte de dados observacionais, principalmente para regiões do planeta onde exista uma carência considerável de observações meteorológicas ou ainda onde a confiabilidade dos dados observados é questionável. Para uma melhor confiabilidade é necessário um estudo sobre a qualidade desses dados de reanálise. Um bom estudo de qualidade dos dados é uma etapa fundamental antes de se iniciar qualquer forma de uso dos dados de reanálise.

O Brasil apresenta um expressivo crescimento na utilização de fontes de energia eólica, mas ainda há um vasto potencial a ser explorado. A avaliação precisa do potencial eólico em uma determinada região é um passo fundamental para a gestão do aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia.

A avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime dos ventos (ANEEL, 2008). A produção de energia em uma turbina eólica depende do cubo da velocidade do vento. Sendo assim, a velocidade do vento é uma variável muito importante em uma avaliação do recurso eólico. Um pequeno erro nos dados de velocidade do vento pode representar grandes desvios em termos de previsão de potência eólica, o que pode levar a incertezas no retorno do investimento de um projeto (Martins et al., 2008). Além disso, a velocidade do vento varia com a altura acima do solo. Em qualquer altura, a velocidade do vento depende da rugosidade do solo, da presença de obstáculos, do relevo, da estabilidade atmosférica, etc.

A avaliação do potencial eólico depende, conseqüentemente, de boa disponibilidade de dados observacionais para o cálculo de estatísticas, assim como de boas metodologias para estimar a velocidade do vento a 50 m (ou mais) acima do solo, uma vez que a maioria das redes de observações meteorológicas medem o vento a 10 m de altura.

Com isso, o objetivo do presente trabalho é investigar boas técnicas de estimar a velocidade do vento a 50 m (ou mais) acima do solo, tendo em vista que essas técnicas ajudam na avaliação do potencial eólico. Para algumas dessas técnicas são necessários dados em níveis inferiores (por exemplo 10 metros de altura) para poder estimar a velocidade do vento em níveis superiores (por exemplo 50 metros de altura). Para poder realizar análises com bases de dados que contemplam um conjunto homogêneo de dados para um período qualquer de interesse, é feita uma avaliação do desempenho das séries de dados dos modelos CFSR e CFSV2 vindos da reanálise dos NCEP/NCAR; essa avaliação é realizada para o estado de Minas Gerais e verifica a possível utilização desses dados de reanálise na ausência de dados observacionais de velocidade do vento e temperatura do ar. A avaliação é feita através de análise estatística, na qual busca-se fazer uma análise comparativa a partir dos dados de reanálise e de dados disponíveis em 17 estações automáticas.

Um projeto de implementação de usina eólica envolve muito investimento. Por isso, uma análise do potencial eólico da região de interesse é de fundamental importância. Para auxiliar no planejamento minucioso da produção de energia é necessário ter conhecimento

sobre a velocidade e o regime de ventos, sendo necessária a instalação de novas torres na altura dos futuros aerogeradores. No entanto, o planejamento, instalação e manutenção de mastros de medição do vento é um empreendimento caro e, se a campanha de medição do vento não revelar um potencial energético de vento promissor na área selecionada, uma quantidade considerável de investimento é irreversivelmente perdida (Carvalho et al., 2014). Desta forma, existe a necessidade de estudar fontes alternativas de dados que sejam confiáveis, de fácil obtenção e cujo custo associado seja relativamente baixo. Isso inclui analisar metodologias que utilizam diferentes meios para obter a estimativa da velocidade do vento. Esses estudos podem levar à construção de séries históricas de dados das variáveis meteorológicas de interesse e nas alturas desejadas, sem a necessidade de investir em novas torres com as alturas de interesse. O propósito em fazer essas análises é conseguir estudar áreas de interesse para instalação de novos parques eólicos sem que o local em vista tenha necessariamente uma torre na altura dos possíveis futuros aerogeradores. O fato é que se torna mais viável instalar torres na altura das turbinas em um local pré-selecionado onde será mais provável satisfazer os interesses de produção de energia do que instalar estas mesmas torres em um local qualquer, com maior probabilidade de não satisfazer os interesses de produção.

A partir de séries de dados medidos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão do ar, velocidade do vento, etc., é possível obter perfis de velocidade do vento. A obtenção desses perfis pode ser feita através de modelos como o perfil logarítmico, a lei da potência, os perfis com funções de correção de estabilidade, modelos criados com redes neurais, entre outros. Neste trabalho concentrou-se no estudo do perfil logarítmico e em dois perfis com correção de estabilidade. Os modelos aqui estudados são introduzidos no Capítulo 2 e avaliados no Capítulo 4. Em alguns casos para a estimar a velocidade do vento é necessário o uso do comprimento de rugosidade superficial. Na teoria clássica da camada limite turbulenta logarítmica, o comprimento de rugosidade aerodinâmica da superfície é especificado como um nível no qual a velocidade média extrapolada é nula, quando plotada em relação ao logaritmo da altura z (Zilitinkevich et al., 2001).

Com dados de reanálise do modelo CFSV2 e com dados medidos em uma torre localizada em Minas Gerais, foi possível estimar a velocidade do vento em níveis superiores a 10 m. Essas velocidades estimadas são comparadas com as medições reais obtidas na torre citada. As estimativas de velocidade do vento foram realizadas de três maneiras distintas, sendo que duas delas consideram os efeitos da estabilidade atmosférica e a terceira considera que a atmosfera é neutra. Ao considerar os efeitos da estabilidade atmosférica, funções de correção de estabilidade devem ser utilizadas. Com isso, foi possível verificar a importância de considerar (ou não) os efeitos da estabilidade atmosférica nas estimativas de velocidade do vento.

A seguir, no Capítulo 2 serão introduzidos os conceitos fundamentais necessários para

a compreensão dos assuntos abordados, bem como os modelos utilizados para calcular a estimativa da velocidade do vento e o comprimento de rugosidade. No Capítulo 3 será apresentada a análise comparativa entre dados de reanálise e dados observacionais de velocidade do vento e de temperatura do ar. No Capítulo 4 serão apresentadas algumas formulações para a função de estabilidade atmosférica; serão descritos os conjuntos de dados utilizados e apresentados os resultados obtidos nesse trabalho separados por ESTUDO 1, ESTUDO 2 e ESTUDO 3; apresenta-se também uma comparação entre os resultados obtidos de estimativa da velocidade do vento; finaliza-se o capítulo com uma análise de estimativa da velocidade do vento para 100 m de altura. Por fim, no Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e recomendações do trabalho.

Capítulo 2

Conceitos fundamentais

Este capítulo contém conceitos relevantes para este estudo. Descreve-se o conceito de camada limite atmosférica. Apresenta-se uma breve descrição sobre médias e flutuações. Relaciona-se a teoria de similaridade e modelos de perfis de velocidade do vento. Apresenta-se o significado do comprimento de rugosidade e alguns métodos de estimar seu valor. É feita uma breve explicação sobre as séries de dados de reanálise. Por fim, é possível verificar os descritores estatísticos de erro empregados nas análises deste estudo.

2.1 Camada limite atmosférica

De acordo com Stull (1988) a camada limite atmosférica (CLA) é a parte da troposfera que é afetada diretamente pelas características da superfície da Terra e que responde às forçantes superficiais em uma escala temporal de uma hora ou menos.

A estrutura da camada limite atmosférica é diferente durante o dia e a noite. Essa diferença vem em resposta ao aquecimento diurno e resfriamento noturno da superfície que promovem fortes variações dos elementos que fazem parte dessa camada (temperatura, umidade, concentração de poluentes, etc.).

O grau de estabilidade da camada limite atmosférica é caracterizado por efeitos de natureza térmica e pode ser classificado como instável, estável ou neutro.

A CLA é instável durante a maior parte do período diurno quando há suficiente aquecimento da superfície pela radiação líquida. A CLA é estável geralmente à noite, quando a superfície se resfria por perda radiativa. A CLA é neutra nos períodos de transição ao nascer e pôr do sol, ou quando o céu está encoberto e a velocidade do vento é alta.

Uma maneira de tratar de turbulência atmosférica é usar teorias de similaridade que, baseadas em argumentos dimensionais e empíricos, buscam explicar a turbulência na CLA.

2.2 Médias e flutuações

Uma estratégia para descrever escoamentos turbulentos pode ser vista em Reynolds (1894). Ele supõe que qualquer processo $p(x, t)$ que dependa do espaço e do tempo pode ser decomposto em uma componente média (\bar{p}) e uma flutuação em torno desta média (p'). A grandeza p pode ser uma componente da velocidade do vento, a temperatura, a concentração de um poluente, etc. Por exemplo a componente horizontal u da velocidade do vento pode ser representada pela Decomposição de Reynolds por

$$u = \bar{u} + u'. \quad (2.1)$$

Essa decomposição satisfaz um conjunto de relações usualmente conhecido na literatura com o nome de postulados de Reynolds. Prosseguindo com o exemplo da componente horizontal u da velocidade do vento, são os seguintes os postulados que regem as operações de média probabilística:

$$\overline{u'} = 0, \quad (2.2)$$

$$\overline{uw} = \bar{u}\bar{w} + \overline{w'u'}, \quad (2.3)$$

$$\overline{u + v} = \bar{u} + \bar{v}, \quad (2.4)$$

$$\overline{qu} = q\bar{u}, \quad (2.5)$$

onde q é uma constante e $\overline{w'u'}$ é a covariância entre as flutuações das componentes w e u da velocidade do vento.

A medição de turbulência na atmosfera permite o cálculo direto de fluxos turbulentos, os quais são relacionados às covariâncias entre as flutuações (tais como $\overline{w'u'}$). Porém, existe a necessidade de utilizar instrumentos de alto custo e operação relativamente difícil.

Na prática, as médias que são utilizadas em micrometeorologia são médias amostrais, em geral sobre períodos de cerca de 30 minutos a 1 hora de duração. De acordo com Dias (2017), as formas mais comuns de se extrair médias e flutuações em micrometeorologia são as seguintes: médias de bloco, remoção linear de tendência e filtragens. Essas médias amostrais não são necessariamente iguais às médias probabilísticas. Na prática as médias probabilísticas são substituídas por médias amostrais dos experimentos realizados, como uma forma de aproximação.

É importante saber com qual tipo de média está sendo trabalhado. Nesse sentido, um artigo interessante é o de Maggiotto et al. (2007). Nele é possível encontrar uma discussão sobre os tipos de sensores e medidas feitas por estações de superfície automáticas, assim como as dificuldades de medição de algumas variáveis. Discute-se ainda as escalas de tempo de medição e de transmissão de dados. Os autores indicam que um mesmo sensor

pode gerar medidas em diversas escalas de tempo. Notam também que todo sensor, na prática, introduz alguma suavização na variável medida em função de suas características, geralmente resumida em seu tempo de resposta: quanto menor o tempo de resposta de um sensor, mais proximamente “instantânea” será a sua medida.

2.3 Teoria de Similaridade e relações de perfis de velocidade do vento

Se dois fluidos são dinamicamente similares é possível expressar esta similaridade a partir de variáveis adimensionais, que são um meio para simplificar problemas físicos. A Teoria da Similaridade baseada na organização de variáveis adimensionais, ajuda a entender os fenômenos de turbulência.

A Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO) desenvolvida por Monin e Obukhov (1954), tem o propósito de descrever perfis médios e estatísticas turbulentas na Camada Superficial da CLA. Essa Teoria considera que a dinâmica na camada superficial da atmosfera é governada por apenas alguns parâmetros: a altura acima da superfície (z), o parâmetro de fluabilidade $\left(g/\bar{\theta}\right)$ (onde g é a aceleração da gravidade e $\bar{\theta}$ é a temperatura potencial média), a tensão de cisalhamento na superfície $\tau = -\bar{\rho} \overline{w'u'}$ (onde $\bar{\rho}$ é a densidade média do ar) e o fluxo de calor sensível na superfície $H = \bar{\rho} c_p \overline{w'\theta'}$ (onde c_p é o calor específico do ar a pressão constante e $\overline{w'\theta'}$ é a covariância entre as perturbações da componente w da velocidade do vento e da temperatura potencial θ) (Kader e Yaglom, 1990; Moraes et al., 2008). A partir desses parâmetros define-se as escalas de velocidade u_* (ou velocidade de atrito) e a escala turbulenta de temperatura θ_* . Essas escalas típicas do escoamento próximo a superfície são, respectivamente,

$$u_* = \left[\frac{\tau_x^2 + \tau_y^2}{\bar{\rho}^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.6)$$

e

$$\theta_* = \frac{H}{\bar{\rho} c_p u_*}, \quad (2.7)$$

onde $\tau_x = -\bar{\rho} \overline{u'w'}$ e $\tau_y = -\bar{\rho} \overline{v'w'}$ são as tensões superficiais na direção das componentes u e v do vetor velocidade do vento.

A variável adimensional de estabilidade de Monin-Obukhov (ζ) é dada por

$$\zeta = \frac{z}{L} = -\frac{kgz\theta_*}{\bar{\theta}u_*^2}, \quad (2.8)$$

onde k é a constante de von Kármán ($k = 0,4$) e L é o comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov.

A variável ζ indica a magnitude relativa dos termos de produção/destruição térmica e de produção mecânica de energia cinética turbulenta. Quando $\zeta = 0$ a estabilidade na camada superficial é neutra. Se $\zeta > 0$ o termo de empuxo ajuda a destruir a turbulência e a camada superficial é estável. Se $\zeta < 0$ a camada superficial é instável e o termo de empuxo produz turbulência (Dias, 2017).

Aplicando a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov, supõe-se que $\zeta = z/L$ é a variável adimensional independente. Outras grandezas na camada limite superficial, devidamente adimensionalizadas, devem ser cada uma delas uma função de ζ . Em princípio, essas grandezas devem ser adimensionalizadas por u_* , θ_* , e z . No caso do gradiente de velocidade vertical (adimensionalizado) tem-se

$$\phi_r(\zeta) = \frac{kz}{u_*} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}. \quad (2.9)$$

Considerando agora a atmosfera neutra ($\zeta = 0$) a equação (2.9) fica

$$1 = \phi_r(\zeta) = \frac{kz}{u_*} \frac{d\bar{u}}{dz}. \quad (2.10)$$

Integrando a equação (2.10) entre um nível z_0 e o nível de medição z e isolando \bar{u} obtém-se

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right). \quad (2.11)$$

A equação (2.11) é o conhecido perfil logarítmico de velocidade do vento para uma camada superficial sem estratificação de densidade. z_0 é chamado de comprimento de rugosidade.

Escrevendo o perfil logarítmico para representar a velocidade do vento em duas alturas z_{i+h} e z_i , e subtraindo uma expressão da outra, pode-se relacionar as velocidades do vento em duas alturas:

$$\bar{u}_{i+h} = \frac{u_*}{k} (\ln z_{i+h} - \ln z_0), \quad (2.12)$$

$$\bar{u}_i = \frac{u_*}{k} (\ln z_i - \ln z_0). \quad (2.13)$$

Logo,

$$\bar{u}_{i+h} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{i+h}}{z_i} \right) \right] + \bar{u}_i, \quad (2.14)$$

onde o índice i ($i > 0$) indica a altura z em metros. Por exemplo a altura de 10 m é representada por z_{10} e a velocidade do vento a 10 m de altura é representada por u_{10} . A

variável h é sempre positiva, o que implica em $i + h > i$, ou seja, $i + h$ indica uma altura maior do que i .

O perfil logarítmico deve ser aplicado estritamente à camada superficial neutra, pois à medida que a estabilidade se afasta de neutra os perfis se desviam cada vez mais de uma função logarítmica, tornando as estimativas menos confiáveis (Kaimal e Finnigan, 1994).

Assim, para estratificação não-nula ($\zeta \neq 0$) o perfil logarítmico é corrigido por uma função da estabilidade atmosférica $\Psi(\zeta)$ que mais adiante será definida. Neste caso a integral da equação (2.10) resulta em

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi(\zeta) \right]. \quad (2.15)$$

Usando o mesmo critério anterior e representando a velocidade do vento em duas alturas z_{i+h} e z_i , ao subtrairmos uma expressão da outra, conseguimos relacionar as velocidades do vento em duas alturas:

$$\bar{u}_{i+h} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{i+h}}{z_0} \right) - \Psi(\zeta_{i+h}) \right], \quad (2.16)$$

$$\bar{u}_i = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_i}{z_0} \right) - \Psi(\zeta_i) \right]. \quad (2.17)$$

Logo, o método que prevê a velocidade do vento de uma altura z_{i+h} a partir da velocidade do vento de uma altura de z_i e que depende tanto das alturas z 's quanto de zeta é

$$\bar{u}_{i+h} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{i+h}}{z_i} \right) - \Psi(\zeta_{i+h}) + \Psi(\zeta_i) \right] + \bar{u}_i. \quad (2.18)$$

A função da estabilidade atmosférica $\Psi(\zeta)$ é dada por

$$\Psi(\zeta) = \int \frac{1 - \phi_\tau}{\zeta} d\zeta, \quad (2.19)$$

onde ϕ_τ é a função adimensional do gradiente de velocidade do vento que depende da estabilidade atmosférica. No Capítulo 4 serão estudadas algumas variações de formulações de ϕ_τ .

2.4 Comprimento de rugosidade

O comprimento de rugosidade (z_0) caracteriza a rugosidade local do terreno. A rugosidade da superfície pode variar sobre os diferentes tipos de solo.

A estimativa do comprimento da rugosidade da superfície é muito importante para o desenvolvimento de alguns modelos que representam processos atmosféricos. A falta ou

presença de vegetação em uma superfície influenciam diretamente z_0 . O comprimento da rugosidade da superfície deve ser considerado parte integrante dos processos atmosféricos modelados (Hansen, 1993).

Se o comprimento da rugosidade for conhecido e a velocidade do vento for medida em uma altura, o perfil de velocidade do vento pode ser estimado, por exemplo, a partir da Equação (2.18). Existem várias maneiras de estimar o comprimento da rugosidade da superfície. Aqui serão discutidos alguns destes métodos.

A técnica descrita mais frequentemente envolve analisar o logaritmo natural da altura de medição versus a velocidade do vento e obter os resultados através de regressão linear. Assim, z_0 é obtido pela sua relação com o coeficiente linear da reta estabelecida pela regressão (Barthelmie et al., 1993). Para a aplicação desta técnica é necessário reordenar a Equação (2.11) da seguinte maneira

$$\ln(z_i) = \left(\frac{k}{u_*} \right) \bar{u}_i + \ln(z_0), \quad (2.20)$$

Comparando a Equação (2.20) com uma equação linear do tipo

$$y = ax + b, \quad (2.21)$$

onde a é o coeficiente angular e b o coeficiente linear da reta, pode-se observar

$$y = \ln(z_i), \quad (2.22)$$

$$x = \bar{u}_i, \quad (2.23)$$

$$a = \frac{k}{u_*}, \quad (2.24)$$

$$b = \ln(z_0). \quad (2.25)$$

Neste método deve-se utilizar dados de observação de velocidade do vento em diferentes alturas. Por exemplo, podemos usar valores para as alturas z_{10} , z_{50} , z_{80} e z_{100} . Assim é feito um estudo com diversos perfis de velocidade do vento, e cada um deles fornece um valor estimado de z_0 através das regressões lineares de $y = \ln(z_i)$ em função de $x = \bar{u}_i$. Determina-se z_0 pela seguinte relação analítica

$$z_0 = \exp(b). \quad (2.26)$$

Para aplicar esse método os dados devem pertencer à classe de estabilidade próxima da neutra.

Um método mais simples é aplicar a fórmula de perfil logarítmico às medidas de velocidade do vento em duas alturas (Barthelmie et al., 1993). A fórmula de perfil de velocidade

do vento utilizada por estes autores é diferente da utilizada neste estudo (Equação (2.11)). Em vez de subtrair a Equação (2.13) da Equação (2.12), Barthelmie et. al. relacionam as duas equações dividindo uma pela outra; assim, para obter z_0 é utilizado

$$\ln(z_0) = \left(\frac{\bar{u}_i \ln(z_{i+h}) - \bar{u}_{i+h} \ln(z_i)}{\bar{u}_i - \bar{u}_{i+h}} \right). \quad (2.27)$$

Neste método basta aplicar os valores das alturas a serem analisadas e das velocidades do vento relacionadas a estas alturas. Assim é feito um estudo com diversos perfis de velocidade do vento, e cada um deles fornece um valor estimado de z_0 através da relação

$$z_0 = \exp(C). \quad (2.28)$$

onde C é valor obtido com o cálculo do segundo membro da Equação (2.27). Novamente ao utilizar a fórmula do perfil logarítmico deve-se utilizar dados que apresentam estabilidade próxima da neutra.

Outra forma de fazer a estimativa do comprimento de rugosidade é utilizando a Equação (2.11). Primeiramente isolando z_0 na Equação (2.11) obtém-se

$$z_0 = z_i \exp \left(\frac{-\bar{u}_i k}{u_*} \right). \quad (2.29)$$

Neste caso a análise é feita em apenas uma altura por vez. Os valores de z_0 são obtidos diretamente aplicando as séries de dados selecionadas. Os dados analisados devem ser restritos a classe de estabilidade próxima da neutra.

Também é possível calcular a rugosidade isolando z_0 na Equação (2.15). Para esta equação obtém-se

$$z_0 = z_i \exp \left(\frac{-\bar{u}_i k}{u_*} - \Psi(\zeta_i) \right). \quad (2.30)$$

Novamente a análise deve ser feita em apenas uma altura por vez, e pode-se analisar todos os dados disponíveis devido à presença da função de estabilidade.

O método acima descrito também pode ser verificado no artigo de Newman e Klein (2014).

Uma abordagem alternativa para a estimativa de z_0 utilizando todo o conjunto de dados, e portanto incluindo condições atmosféricas não neutras, pode ser proposta como se segue. Primeiramente, os elementos da Equação (2.15) são reordenados, obtendo

$$\frac{\bar{u}_i}{u_*} = -\frac{1}{k} \Psi(\zeta_i) + \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z_i}{z_0} \right). \quad (2.31)$$

Comparando esta equação com uma equação linear do tipo $y = ax + b$, tem-se as seguintes relações:

$$y = \frac{\bar{u}_i}{u_*}, \quad (2.32)$$

$$x = \Psi(\zeta_i), \quad (2.33)$$

$$a = -\frac{1}{k}, \quad (2.34)$$

$$b = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z_i}{z_0} \right). \quad (2.35)$$

Com o objetivo de estimar z_0 , é feita uma regressão linear de $y = \frac{\bar{u}_i}{u_*}$ em função de $x = \Psi(\zeta_i)$. O valor de z_0 é determinado pelos valores do coeficiente linear (b) e do coeficiente angular (a) da reta de regressão linear pela seguinte relação analítica

$$z_0 = z_i \exp \left(\frac{b}{a} \right). \quad (2.36)$$

Novamente a análise é feita em apenas uma altura por vez.

2.5 Dados de reanálise

Para diversos estudos atmosféricos são necessários dados observacionais com boa qualidade e disponibilidade. Mesmo sabendo da importância dessas observações, uma das grandes dificuldades para fazer estudos deste tipo ainda é a baixa quantidade e qualidade de informações de variáveis meteorológicas disponíveis. Algumas regiões possuem poucas estações meteorológicas para coleta desses dados, ou apresentam séries históricas com falhas de medição devido à falta de manutenção ou outros problemas técnicos. Diante desses problemas, alguns centros de previsão do tempo e clima disponibilizam produtos de reanálise, que são séries de dados meteorológicos obtidos através da assimilação e reanálise de dados observados em superfície (estações), aviões, navios, imagens de satélite, imagens de radar e radiossondagens em todo o planeta (Kalnay et al., 1996).

Os produtos de reanálise utilizados neste trabalho são dos *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR). Estas séries de dados são provenientes de modelagem numérica atmosférica, possuem resolução horizontal razoavelmente alta (T382L64), de aproximadamente 38 km, para o período entre 01/01/1979 e 31/03/2011, e são elaborados a partir do modelo *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR). Para os dados após 30 de março de 2011 até a presente data, uma nova reanálise, denominada *Climate Forecast System Version 2* (CFSV2), com resolução ainda melhor, de aproximadamente 22 km, está sendo gerada e permite a extensão das séries até o presente (Saha et al., 2010). Os dados estão disponíveis no sítio <https://rda.ucar.edu/>.

2.6 Descritores estatísticos de erros

As comparações e avaliações executadas neste trabalho para a análise do desempenho das séries de dados, foram realizadas com os seguintes descritores estatísticos: a média (\bar{x}), o viés, o erro médio absoluto (EMA), a raiz do erro quadrático médio (REQM), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de correlação (r). De forma geral, erro é a diferença entre o resultado de um valor estimado e o valor medido de uma determinada grandeza. As expressões empregadas nesta avaliação foram adaptadas de Wilks (2006):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.37)$$

$$\text{VIÉS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{s_i} - x_{o_i}), \quad (2.38)$$

$$\text{EMA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{s_i} - x_{o_i}|, \quad (2.39)$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{s_i} - x_{o_i})^2}, \quad (2.40)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.41)$$

$$r = \frac{c_{x_s x_o}}{s_{x_s} s_{x_o}}. \quad (2.42)$$

Nas Equações (2.37) a (2.42), n é o número total de dados a serem analisados, x_s é o dado estimado, x_o é o dado observado, x_i é o dado a ser analisado, $c_{x_s x_o}$ é a covariância entre os pares de dados estimados e os dados observados, s_{x_s} é o desvio padrão dos dados estimados e s_{x_o} é o desvio padrão dos dados observacionais.

Para uma melhor visualização da distribuição dos pontos é interessante usar *boxplots*. O *boxplot* é formado pelo primeiro e terceiro quartil e pela mediana. Ele é composto por uma reta (*whisker* ou fio de bigode) que estende-se a partir da caixa, indicando a variabilidade fora do quartil superior e do quartil inferior. Os limites são comumente calculados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{limite inferior} &\rightarrow Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1), \\ \text{limite superior} &\rightarrow Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1), \end{aligned}$$

onde Q_1 , Q_2 e Q_3 são o primeiro quartil, o segundo quartil e o terceiro quartil, respectivamente.

Os valores atípicos ou *outliers* (valores discrepantes) podem ser plotados como pontos individuais. Porém em nossas análises optamos em não plotar esses pontos para os gráficos não ficarem muito “poluídos”.

Capítulo 3

Análise comparativa entre dados de reanálise e dados observacionais

Alguns modelos utilizados para estimar a velocidade do vento necessitam de dados em níveis inferiores (por exemplo 10 m de altura) para prever a velocidade em alturas superiores (por exemplo 50 m de altura). A maioria das redes de observações meteorológicas medem o vento a 10 m de altura. Porém muitas vezes os dados locais não estão disponíveis, podendo existir poucas estações meteorológicas na região de interesse e séries históricas com um grande número de falhas de medição. Assim, uma das grandes dificuldades para a realização de estudos com dados meteorológicos ainda é a baixa quantidade e a má qualidade das informações disponíveis. Uma alternativa é o uso de uma base de dados em escala global. Alguns centros de previsão do tempo e clima disponibilizam produtos de reanálise, que consistem em bases de dados de variáveis meteorológicas que são preparadas com o uso de modelos numéricos de previsão do tempo e alimentados com dados coletados de diversas formas e em todo o planeta. Para alcançar o objetivo de estimar a velocidade do vento, tendo em vista que a torre meteorológica estudada não possui dados a 10 m de altura, foi realizada uma análise dos dados de reanálise dos NCEP/NCAR para verificar a possível utilização desses dados nas análises de estimativa da velocidade do vento.

Neste capítulo encontra-se o desenvolvimento da avaliação do desempenho das séries de dados de velocidade do vento e de temperatura do ar vindas dos NCEP/NCAR para o estado de Minas Gerais. A velocidade do vento foi avaliada por se tratar de um interesse direto deste estudo. Já a temperatura do ar foi analisada por ser uma variável que pode ser utilizada no cálculo da densidade do ar, a qual tem relação com a potência de uma turbina eólica; além disso, a temperatura do ar trata-se de uma variável clássica de meteorologia.

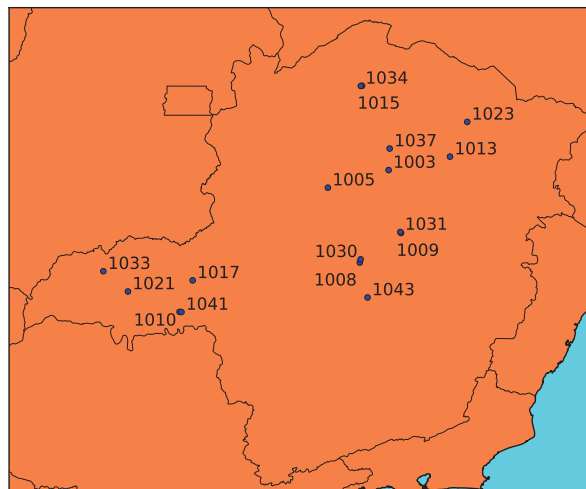


Figura 3.1: Mapa contendo a localização das 17 estações selecionadas.

3.1 Área de estudo e dados utilizados

O estado de Minas Gerais está localizado na Região Sudeste do Brasil entre as latitudes de 14° e 22° Sul (S) e as longitudes 39° e 51° Oeste (W). É o quarto estado brasileiro com maior área territorial (586.528 km²). Minas Gerais é inteiramente formado por planaltos, predominando o planalto Atlântico e também o planalto Central na porção noroeste, com planaltos sedimentares. A vegetação predominante é a do Cerrado. O clima varia desde o quente semiárido até o mesotérmico úmido (Amarante et al., 2010).

O conjunto de dados empregados neste estudo é constituído por séries provenientes da rede de estações meteorológicas de superfície da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Para esta análise foram utilizados dados de velocidade do vento e temperatura do ar de 17 estações (Figura 3.1). Esta escolha deve-se ao fato de suas localizações estarem em destaque no atlas eólico de Minas Gerais (Amarante et al., 2010), como áreas mais promissoras para empreendimentos eolielétricos no estado. O período de estudo varia de estação para estação entre os anos de 1998 a 2015. Foram utilizados todos os dados disponíveis das estações meteorológicas escolhidas. Além dos dados medidos nas estações meteorológicas, utilizamos os dados da velocidade do vento e da temperatura do ar dos produtos de reanálise dos NCEP/NCAR. As séries de dados elaboradas a partir do modelo CFSR foram utilizadas para a comparação com os dados observacionais do período de 01/01/1998–31/03/2011. Para o período de 01/04/2011–31/12/2015 foram utilizadas as séries de dados elaboradas a partir do modelo CFSV2.

A análise entre os dados de estações automáticas e os dados de reanálise dos NCEP/

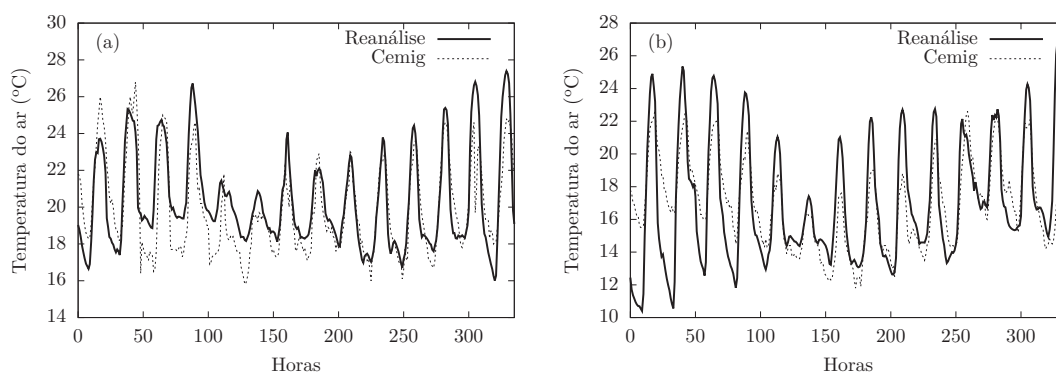


Figura 3.2: Comparação entre séries temporais de temperatura do ar para a estação 1031 — Reanálise *versus* Cemig: (a) Período de 01 a 14 de janeiro de 2009; (b) Período de 01 a 14 de julho de 2009.

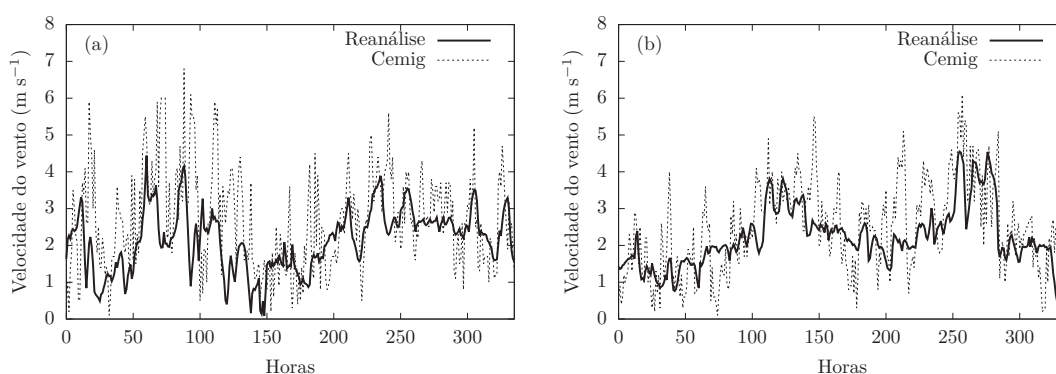


Figura 3.3: Comparação entre séries temporais de velocidade do vento para a estação 1031 — Reanálise *versus* Cemig: (a) Período de 01 a 14 de janeiro de 2009; (b) Período de 01 a 14 de julho de 2009.

NCAR foi feita com base nas médias horárias da temperatura do ar a 2 metros e da velocidade do vento a 10 metros de altura do solo.

3.2 Resultados e discussão

A primeira etapa da análise foi referente à quantidade de anos em que as estações estiveram ativas e quais as medições realizadas em cada uma delas. Com isso foram selecionados todos os dados a serem utilizados.

Os gráficos da Figura 3.2 e da Figura 3.3, mostram a temperatura do ar e a velocidade do vento da estação meteorológica 1031 para duas estações do ano em um período de duas semanas. Visualmente já é possível observar que a temperatura do ar parece acompanhar muito bem os dados de reanálise. Porém, a velocidade do vento não segue o mesmo padrão.

Tabela 3.1: Estatísticas com dados de temperatura do ar (°C) — CFSR

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r
Bocaiúva 1003	41.205	−0,62	1,90	2,47	0,86
Buritzeiro 1005	92.620	−0,49	2,22	2,81	0,85
Curvelo 1008	25.024	−0,63	2,02	2,60	0,86
Diamantina 1009	26.534	0,93	1,80	2,45	0,86
Uberaba 1010	27.836	0,65	2,17	2,89	0,85
Igicatu 1013	36.948	0,36	1,95	2,51	0,87
Januária 1015	28.155	−0,63	2,09	2,75	0,85
Nova Ponte 1017	95.475	−0,81	2,17	2,73	0,85
Prata 1021	27.910	0,13	2,27	3,04	0,83
Salinas 1023	47.088	−1,84	2,61	3,21	0,84
SE Curvelo 1030	60.011	−0,76	2,10	2,69	0,85
SE Diamantina 1031	59.990	0,33	1,83	2,42	0,84
SE Ituiutaba 1033	36.991	−0,68	1,95	2,58	0,86
SE Januária 1034	55.346	−1,42	2,30	2,89	0,86
SE Montes Claros 1037	22.948	−1,62	2,15	2,69	0,88
SE Uberaba 1041	51.735	−0,27	1,96	2,64	0,84
Sete Lagoas 1043	22.005	−1,64	2,32	2,92	0,82
Média	44.577	−0,53	2,11	2,72	0,85

Nota: Dados analisados (D.A.)

Após a análise visual das séries horárias, foram calculados os índices estatísticos para todo o período disponível de cada estação, portanto não necessariamente para um período comum. Inicialmente os índices estatísticos foram calculados separadamente para cada modelo da reanálise aqui estudado (CFSR e CSFV2). Nas Tabelas de 3.1 a 3.4 encontram-se os valores obtidos nos cálculos estatísticos feitos para a análise da temperatura do ar e da velocidade do vento. Ressalta-se que alguns desses índices estatísticos foram utilizados em estudos semelhantes de comparação entre dados observados e estimados realizados por Mariano et al. (2017), Stüker et al. (2016), Kaiser-Weiss et al. (2015), Saldanha et al. (2015), Vieira et al. (2006), entre outros.

A maioria dos dados observacionais estão no período que o modelo CFSR abrange. Das 17 estações meteorológicas estudadas apenas 10 contém dados no período que o modelo CSFV2 engloba.

Na Tabela 3.1 encontram-se os resultados dos índices estatísticos para a análise dos dados de reanálise do modelo CFSR para a temperatura do ar. Verifica-se que esses dados apresentaram o menor EMA para a estação Diamantina (1,80 °C) e o maior EMA para Salinas (2,61 °C). Já para a REQM, o mínimo (2,42 °C) se deu para SE Diamantina e o máximo (3,21 °C) para Salinas. O coeficiente de correlação variou entre 0,82 e 0,88. O viés apresentou valores negativos em 70,6% das estações avaliadas, o que indica uma subestimação dos dados de reanálise em relação aos observados, as demais estações avaliadas (29,4%) apresentaram valores positivos mostrando que houve uma superestimação.

Na Tabela 3.2 encontram-se os resultados dos índices estatísticos para a análise dos

Tabela 3.2: Estatísticas com dados de temperatura do ar (°C) — CFSV2

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r
Buritizeiro 1005	38.581	-2,27	2,84	3,50	0,83
Igicatu 1013	32.043	-0,86	2,16	2,79	0,85
Nova Ponte 1017	40.415	-1,72	2,46	3,04	0,88
SE Curvelo 1030	5.412	-0,58	2,25	2,81	0,85
SE Diamantina 1031	38.747	-0,82	1,77	2,28	0,84
SE Ituiutaba 1033	36.955	-1,54	2,26	2,88	0,88
SE Januária 1034	40.668	-2,31	2,83	3,54	0,83
SE Montes Claros 1037	37.535	-2,02	2,51	3,16	0,88
SE Uberaba 1041	16.676	-1,35	1,98	2,57	0,87
Sete Lagoas 1043	5.461	-1,90	2,58	3,18	0,85
Média	29.249	-1,54	2,36	2,97	0,86

Nota: Dados analisados (D.A.)

dados de reanálise do modelo CFSV2 para a temperatura do ar. Verifica-se que esses dados apresentaram o menor EMA para a estação Diamantina (1,77 °C) e o maior EMA para Buritizeiro (2,84 °C). Já para a REQM, o mínimo (2,28 °C) se deu para SE Diamantina e o máximo (3,54 °C) para SE Januária. O coeficiente de correlação variou entre 0,83 e 0,88. Quanto ao viés, todos os valores apresentados são negativos indicando uma subestimação dos dados estimados em relação aos observados.

Para os dados de velocidade do vento, verifica-se na Tabela 3.3 os resultados dos índices estatísticos para a análise dos dados de reanálise do modelo CFSR. Verifica-se que os menores valores de EMA e REQM foram $0,82 \text{ m s}^{-1}$ e $1,03 \text{ m s}^{-1}$, ambos ocorreram na localidade de Igicatu. Já os maiores valores de EMA e REQM foram $1,49 \text{ m s}^{-1}$ e $1,71 \text{ m s}^{-1}$ e ocorreram em SE Montes Claros e Diamantina, respectivamente. O coeficiente de correlação variou entre 0,14 e 0,49. O viés apresentou valores negativos em 47% das estações avaliadas, o que indica uma subestimação dos dados de reanálise em relação aos observados, as demais estações avaliadas (53%) apresentaram valores positivos mostrando que houve uma superestimação.

Na Tabela 3.4 encontram-se os resultados dos índices estatísticos para a análise dos dados de reanálise do modelo CFSV2 para a velocidade do vento. Verifica-se que os menores valores de EMA e REQM foram $0,88 \text{ m s}^{-1}$ e $1,12 \text{ m s}^{-1}$ e ocorreram nas localidades de SE Uberaba e Igicatu, respectivamente. Já os maiores valores de EMA e REQM foram $1,57 \text{ m s}^{-1}$ e $1,91 \text{ m s}^{-1}$, ambos ocorreram em Nova Ponte. O coeficiente de correlação variou entre 0,28 e 0,51. O viés apresentou valores negativos em 40% das estações avaliadas, o que indica uma subestimação dos dados de reanálise em relação aos observados, as demais estações avaliadas (60%) apresentaram valores positivos mostrando que houve uma superestimação.

Após essa primeira avaliação dos dados, optou-se por fazer uma análise conjunta para os dados vindos da reanálise dos modelos CFSR e CFSV2 a fim de deixar as informações

Tabela 3.3: Estatísticas com dados de velocidade do vento (m s^{-1}) — CFSR

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r
Bocaiúva 1003	40.964	−0,30	1,26	1,69	0,14
Buritizeiro 1005	83.021	−0,11	1,09	1,39	0,26
Curvelo 1008	24.545	0,11	0,87	1,10	0,38
Diamantina 1009	26.500	−1,11	1,33	1,71	0,48
Uberaba 1010	27.718	−0,40	1,01	1,32	0,49
Igicatu 1013	36.413	−0,24	0,82	1,03	0,38
Januária 1015	27.353	0,68	1,11	1,38	0,35
Nova Ponte 1017	70.445	0,14	1,24	1,58	0,36
Prata 1021	27.851	−0,71	1,22	1,60	0,48
Salinas 1023	44.187	0,25	1,04	1,29	0,43
SE Curvelo 1030	58.533	−0,47	1,15	1,48	0,42
SE Diamantina 1031	58.081	−0,24	0,93	1,20	0,40
SE Ituiutaba 1033	32.274	0,21	1,01	1,28	0,41
SE Januária 1034	51.876	0,00	1,00	1,28	0,42
SE Montes Claros 1037	24.996	1,31	1,49	1,79	0,34
SE Uberaba 1041	54.621	0,08	0,90	1,16	0,46
Sete Lagoas 1043	20.179	0,11	0,96	1,21	0,35
Média	41.738	−0,04	1,08	1,38	0,39

Nota: Dados analisados (D.A.)

Tabela 3.4: Estatísticas com dados de velocidade do vento (m s^{-1}) — CFSV2

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r
Buritizeiro 1005	32.658	−0,40	1,13	1,48	0,34
Igicatu 1013	31.880	−0,64	0,90	1,12	0,36
Nova Ponte 1017	12.638	1,18	1,57	1,91	0,28
SE Curvelo 1030	5.206	−0,63	1,17	1,48	0,51
SE Diamantina 1031	34.850	−0,14	0,93	1,20	0,42
SE Ituiutaba 1033	27.857	0,30	1,03	1,32	0,38
SE Januária 1034	38.835	0,06	0,99	1,26	0,42
SE Montes Claros 1037	33.679	1,12	1,31	1,58	0,44
SE Uberaba 1041	17.117	0,16	0,88	1,14	0,49
Sete Lagoas 1043	3.017	0,51	1,16	1,49	0,31
Média	23.774	−0,15	1,11	1,40	0,39

Nota: Dados analisados (D.A.)

Tabela 3.5: Estatísticas com dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.R.)	σ (D.R.)	\bar{x} (D.O.)	σ (D.O.)
Bocaiúva 1003	41.205	-0,62	1,90	2,47	0,86	21,02	4,65	21,64	3,92
Buritzeiro 1005	131.201	-1,01	2,40	3,03	0,83	22,97	5,00	23,98	4,76
Curvelo 1008	25.024	-0,63	2,02	2,60	0,86	22,40	4,91	23,03	4,25
Diamantina 1009	26.534	0,93	1,80	2,45	0,86	18,89	4,35	17,95	3,48
Uberaba 1010	27.836	0,65	2,17	2,89	0,85	22,56	5,20	21,90	4,91
Igicatu 1013	68.991	-0,21	2,05	2,64	0,85	21,09	5,00	21,30	3,95
Januária 1015	28.155	-0,63	2,09	2,75	0,85	23,56	4,92	24,19	5,02
Nova Ponte 1017	135.890	-1,08	2,26	2,83	0,85	20,68	4,53	21,76	4,90
Prata 1021	27.910	0,13	2,27	3,04	0,83	23,39	5,42	23,26	4,86
Salinas 1023	47.088	-1,84	2,61	3,21	0,84	21,19	4,83	23,03	4,44
SE Curvelo 1030	65.423	-0,74	2,11	2,70	0,85	22,14	4,93	22,88	4,20
SE Diamantina 1031	98.737	-0,12	1,81	2,36	0,83	18,52	4,21	18,63	3,33
SE Ituiutaba 1033	73.946	-1,11	2,10	2,73	0,86	22,66	4,59	23,77	4,89
SE Januária 1034	96.014	-1,80	2,52	3,18	0,84	23,32	4,86	25,12	4,11
SE Montes Claros 1037	60.483	-1,87	2,37	2,99	0,88	21,44	4,51	23,31	4,78
SE Uberaba 1041	68.411	-0,53	1,96	2,62	0,84	21,84	4,73	22,37	4,13
Sete Lagoas 1043	27.466	-1,69	2,37	2,97	0,83	20,33	4,40	22,02	3,70
Média	61.783	-0,72	2,17	2,79	0,85	21,65	4,77	22,36	4,33

Nota: Dados analisados (D.A.); Dados da reanálise (D.R.); Dados observados (D.O.).

Tabela 3.6: Estatísticas com dados de velocidade do vento (m s^{-1})

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.R.)	σ (D.R.)	\bar{x} (D.O.)	σ (D.O.)
Bocaiúva 1003	40.964	-0,30	1,26	1,69	0,14	2,75	1,05	3,05	1,45
Buritzeiro 1005	115.679	-0,19	1,10	1,42	0,28	2,12	0,88	2,31	1,37
Curvelo 1008	245.45	0,11	0,87	1,10	0,38	2,28	0,94	2,17	1,03
Diamantina 1009	26.500	-1,11	1,33	1,71	0,48	2,29	0,83	3,39	1,48
Uberaba 1010	27.718	-0,40	1,01	1,32	0,49	2,38	1,02	2,78	1,39
Igicatu 1013	68.293	-0,43	0,86	1,07	0,37	1,93	0,89	2,35	0,86
Januária 1015	27.353	0,68	1,11	1,38	0,35	2,42	0,97	1,74	1,12
Nova Ponte 1017	83.083	0,30	1,29	1,63	0,33	2,53	1,07	2,23	1,60
Prata 1021	27.851	-0,71	1,22	1,60	0,48	2,32	0,98	3,04	1,61
Salinas 1023	44.187	0,25	1,04	1,29	0,43	2,49	0,92	2,24	1,35
SE Curvelo 1030	63.739	-0,49	1,15	1,48	0,43	2,10	0,91	2,59	1,52
SE Diamantina 1031	92.931	-0,20	0,93	1,20	0,41	2,28	0,88	2,48	1,23
SE Ituiutaba 1033	60.131	0,25	1,02	1,30	0,40	2,17	0,97	1,92	1,29
SE Januária 1034	90.711	0,03	0,99	1,27	0,42	2,35	1,01	2,32	1,31
SE Montes Claros 1037	58.675	1,20	1,38	1,67	0,39	2,60	1,05	1,40	1,07
SE Uberaba 1041	71.738	0,10	0,90	1,16	0,47	2,27	1,01	2,17	1,19
Sete Lagoas 1043	23.196	0,16	0,98	1,25	0,34	2,23	0,93	2,06	1,19
Média	55.723	-0,04	1,08	1,38	0,39	2,32	0,96	2,37	1,30

Nota: Dados analisados (D.A.); Dados da reanálise (D.R.); Dados observados (D.O.).

mais compactas. Foram calculados os índices estatísticos para todo o período disponível de cada estação meteorológica, não separando os resultados por modelo de reanálise como feito anteriormente. Nas Tabelas 3.5 e 3.6 encontram-se os valores obtidos nos cálculos estatísticos feitos para a análise da temperatura do ar e da velocidade do vento, respectivamente.

Os índices estatísticos apresentados na Tabela 3.5 indicam que os dados de temperatura do ar apresentaram o menor EMA para a estação Diamantina (1,80 °C) e o maior EMA para Salinas (2,61 °C). Já para a REQM, o mínimo (2,36 °C) se deu para SE Diamantina e o máximo (3,21 °C) para Salinas. Quanto ao viés, a grande maioria dos valores apresentados são negativos indicando uma subestimação dos dados estimados em relação aos observados. Os únicos valores positivos ocorreram para as estações de Diamantina (0,93 °C), Uberaba (0,65 °C) e Prata (0,13 °C).

Para os dados de velocidade do vento, verifica-se na Tabela 3.6 que os menores valores de EMA e REQM foram $0,86 \text{ m s}^{-1}$ e $1,07 \text{ m s}^{-1}$, ambos ocorreram na localidade de Igicatu. Já os maiores valores de EMA e REQM foram $1,38 \text{ m s}^{-1}$ e $1,71 \text{ m s}^{-1}$ e ocorreram em SE Montes Claros e Diamantina, respectivamente. O viés apresentou valores negativos em 47% das estações avaliadas, o que indica uma subestimação dos dados de reanálise em relação aos observados, as demais estações avaliadas (53%) apresentaram valores positivos mostrando que houve uma superestimação.

Os dados de reanálise em relação aos dados das estações meteorológicas indicaram um desvio padrão da temperatura do ar maior em todos os casos analisados. Já para velocidade do vento o desvio padrão dos dados das estações da rede Cemig foi maior na maioria dos casos analisados.

Considerando o conjunto de resultados apresentados acima, vê-se claramente que a reanálise da temperatura do ar obteve desempenho melhor comparada com a reanálise da velocidade do vento.

Os resultados da análise dos dados de temperatura do ar indicaram que os dados de reanálise dos modelos CFSR/CFSV2 apresentaram um bom desempenho em relação aos dados observados, na média geral obteve EMA de 2,17 °C, REQM de 2,79 °C e coeficiente de correlação em torno de 0,85. Portanto conclui-se que esses dados apresentam potencial para serem utilizados como fonte alternativa em locais com ausência de estações ou de séries longas de dados meteorológicos.

Já os dados de velocidade do vento, vindos da reanálise, não reproduziram a variação apresentada pelas estações automáticas. Na média geral verificou-se um EMA de $1,08 \text{ m s}^{-1}$, uma REQM de $1,38 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação em torno de 0,39.

Vale salientar que o erro para a temperatura do ar foi proporcionalmente menor em relação ao erro da velocidade do vento. Uma temperatura do ar que deveria ser 26 °C, por exemplo, com um erro de 2 °C gera um erro de 7,69% para mais ou para menos sobre o

valor esperado; já para uma velocidade do vento que deveria ser 4 m s^{-1} , por exemplo, com um erro de 1 m s^{-1} gera um erro de 25% para mais ou para menos sobre o valor esperado.

Um fato a ser destacado é que os dados de reanálise complementam os dados das estações de superfície da rede Cemig com informações importantes sobre os fluxos superficiais de calor sensível, calor latente e de quantidade de movimento, os quais são essenciais para a determinação da estabilidade da atmosfera, que por sua vez modifica significativamente os perfis de velocidade do vento e sua estimativa a 50 metros de altura. Desta forma, em algum momento do nosso estudo será necessária a utilização destas informações oriundas da reanálise.

3.3 Análise comparativa entre dados de reanálise e dados observacionais — Médias móveis de 3h e 5h para os dados da rede Cemig

Nesta seção encontra-se uma análise de comparação entre dados vindos da reanálise do NCEP/NCAR em relação às médias móveis dos dados da rede Cemig. As médias móveis foram feitas de 3 em 3 horas e de 5 em 5 horas. Os resultados dos índices estatísticos encontram-se nas Tabelas de 3.7 a 3.10. Para os dados de temperatura do ar a mudança não é muito perceptível. O que mais se destaca é a redução do desvio padrão nos dados da rede Cemig, o restante dos índices estatísticos se mantem praticamente os mesmos. Quanto aos dados de velocidade do vento, percebe-se uma melhora nos resultados. Verificam-se reduções do EMA e da REMQ, um aumento no coeficiente de correlação e redução do desvio padrão nos dados da rede Cemig.

A Figura 3.4 mostra a temperatura do ar para o local da estação meteorológica 1031 no período de duas semanas. São plotados dados de reanálise *versus* dados da rede Cemig. A Figura 3.4(a) refere-se aos dados de reanálise *versus* dados da Cemig sem médias móveis, a Figura 3.4(b) refere-se aos dados de reanálise *versus* dados da rede Cemig com médias móveis de 3 em 3 horas e a Figura 3.4(c) refere-se aos dados de reanálise *versus* dados da rede Cemig com médias móveis de 5 em 5 horas. Da Figura 3.4(a) até 3.4(c) percebe-se uma pequena suavização nas curvas geradas com os dados da rede Cemig.

A Figura 3.5 mostra a velocidade do vento para o local da estação meteorológica 1031 no período de duas semanas. São plotados dados de reanálise *versus* dados da rede Cemig. A Figura 3.5(a) refere-se aos dados de reanálise *versus* dados da Cemig sem médias móveis, a Figura 3.5(b) refere-se aos dados de reanálise *versus* dados da rede Cemig com médias móveis de 3 em 3 horas e a Figura 3.5(c) refere-se aos dados de reanálise *versus* dados da rede Cemig com médias móveis de 5 em 5 horas. Partindo da Figura 3.5(a) até 3.5(c) percebe-se uma boa suavização nas curvas geradas com os dados da rede Cemig.

Os dados de velocidade do vento da rede Cemig passam a acompanhar melhor os dados vindos da reanálise.

Tabela 3.7: Estatísticas com dados de temperatura do ar (°C) — Médias móveis de 3h para os dados da rede Cemig

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.R.)	σ (D.R.)	\bar{x} (D.O.)	σ (D.O.)
Bocaiúva 1003	38.580	-0,62	1,90	2,46	0,86	21,01	4,67	21,63	3,83
Buritizeiro 1005	126.843	-1,02	2,36	2,98	0,83	22,97	5,00	23,99	4,64
Curvelo 1008	24.135	-0,64	2,02	2,59	0,86	22,39	4,91	23,03	4,16
Diamantina 1009	25.205	0,93	1,81	2,45	0,86	18,92	4,37	17,99	3,41
Uberaba 1010	26.951	0,66	2,14	2,84	0,85	22,54	5,20	21,89	4,78
Igicatu 1013	67.400	-0,21	2,06	2,65	0,85	21,08	4,99	21,29	3,86
Januária 1015	26.993	-0,63	2,03	2,67	0,86	23,55	4,93	24,19	4,88
Nova Ponte 1017	133.788	-1,08	2,20	2,76	0,85	20,67	4,54	21,75	4,78
Prata 1021	27.210	0,14	2,25	3,02	0,83	23,37	5,42	23,23	4,75
Salinas 1023	44.014	-1,83	2,60	3,19	0,84	21,26	4,85	23,08	4,35
SE Curvelo 1030	64.978	-0,74	2,10	2,68	0,85	22,14	4,93	22,88	4,10
SE Diamantina 1031	96.574	-0,12	1,81	2,36	0,83	18,50	4,21	18,62	3,27
SE Ituiutaba 1033	73.584	-1,11	2,04	2,65	0,87	22,65	4,58	23,76	4,76
SE Januária 1034	95.310	-1,80	2,52	3,16	0,84	23,31	4,86	25,11	4,01
SE Montes Claros 1037	55.402	-1,84	2,31	2,91	0,88	21,48	4,54	23,32	4,69
SE Uberaba 1041	67.967	-0,53	1,94	2,58	0,85	21,84	4,73	22,37	4,02
Sete Lagoas 1043	27.365	-1,70	2,37	2,97	0,83	20,32	4,40	22,02	3,62
Média	61.482	-0,72	2,16	2,78	0,85	21,69	4,78	22,41	4,26

Nota: Dados analisados (D.A.); Dados da reanálise (D.R.); Dados observados (D.O.).

Tabela 3.8: Estatísticas com dados de temperatura do ar (°C) — Médias móveis de 5h para os dados da rede Cemig

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.R.)	σ (D.R.)	\bar{x} (D.O.)	σ (D.O.)
Bocaiúva 1003	36.704	-0,62	1,94	2,49	0,86	21,01	4,67	21,63	3,68
Buritizeiro 1005	123.876	-1,02	2,36	2,97	0,83	22,97	4,99	23,99	4,46
Curvelo 1008	23.371	-0,65	2,05	2,62	0,86	22,37	4,92	23,02	4,01
Diamantina 1009	24.040	0,92	1,85	2,50	0,85	18,93	4,39	18,01	3,31
Uberaba 1010	26.160	0,66	2,12	2,83	0,85	22,54	5,20	21,87	4,58
Igicatu 1013	66.144	-0,21	2,10	2,70	0,85	21,07	4,99	21,28	3,72
Januária 1015	25.985	-0,63	1,99	2,61	0,86	23,55	4,93	24,18	4,66
Nova Ponte 1017	132.067	-1,08	2,16	2,70	0,85	20,66	4,54	21,73	4,59
Prata 1021	26.605	0,14	2,25	3,02	0,83	23,36	5,42	23,22	4,57
Salinas 1023	41.363	-1,80	2,61	3,18	0,84	21,31	4,87	23,11	4,20
SE Curvelo 1030	64.568	-0,74	2,13	2,70	0,85	22,14	4,93	22,88	3,95
SE Diamantina 1031	94.813	-0,13	1,84	2,40	0,82	18,48	4,21	18,61	3,18
SE Ituiutaba 1033	73.246	-1,11	2,01	2,60	0,87	22,64	4,58	23,75	4,57
SE Januária 1034	94.693	-1,80	2,56	3,19	0,84	23,30	4,86	25,10	3,85
SE Montes Claros 1037	51.613	-1,80	2,27	2,85	0,88	21,50	4,56	23,30	4,52
SE Uberaba 1041	67.624	-0,53	1,95	2,59	0,85	21,84	4,73	22,37	3,87
Sete Lagoas 1043	27.271	-1,70	2,39	2,99	0,83	20,32	4,40	22,01	3,51
Média	60.214	-0,72	2,17	2,78	0,85	21,69	4,78	22,40	4,10

Nota: Dados analisados (D.A.); Dados da reanálise (D.R.); Dados observados (D.O.).

Tabela 3.9: Estatísticas com dados de velocidade do vento (m s^{-1}) — Médias móveis de 3h para os dados da rede Cemig

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.R.)	σ (D.R.)	\bar{x} (D.O.)	σ (D.O.)
Bocaiúva 1003	38.011	-0,30	1,15	1,56	0,15	2,76	1,05	3,05	1,28
Buritzeiro 1005	102.856	-0,27	0,96	1,24	0,33	2,13	0,89	2,40	1,17
Curvelo 1008	23.315	0,10	0,80	1,01	0,42	2,29	0,94	2,19	0,92
Diamantina 1009	25.120	-1,10	1,27	1,62	0,51	2,28	0,83	3,38	1,38
Uberaba 1010	26.657	-0,41	0,92	1,20	0,53	2,38	1,02	2,79	1,26
Igicatu 1013	65.830	-0,43	0,79	0,98	0,42	1,94	0,89	2,37	0,73
Januária 1015	25.370	0,66	1,04	1,30	0,37	2,42	0,97	1,77	1,03
Nova Ponte 1017	68.008	0,11	1,11	1,41	0,38	2,57	1,09	2,46	1,40
Prata 1021	27.062	-0,72	1,14	1,48	0,51	2,33	0,98	3,05	1,48
Salinas 1023	40.295	0,21	0,94	1,16	0,46	2,51	0,92	2,30	1,22
SE Curvelo 1030	60.949	-0,52	1,02	1,29	0,48	2,12	0,92	2,64	1,31
SE Diamantina 1031	86.434	-0,24	0,81	1,05	0,46	2,31	0,88	2,55	1,06
SE Ituiutaba 1033	52.887	0,17	0,87	1,10	0,47	2,20	0,98	2,04	1,11
SE Januária 1034	84.924	-0,01	0,86	1,09	0,48	2,38	1,01	2,39	1,12
SE Montes Claros 1037	47.663	1,13	1,28	1,55	0,45	2,63	1,07	1,51	0,96
SE Uberaba 1041	68.982	0,08	0,80	1,02	0,52	2,29	1,02	2,21	1,04
Sete Lagoas 1043	20.529	0,09	0,86	1,08	0,39	2,27	0,94	2,18	1,01
Média	51.680	-0,07	0,97	1,22	0,45	2,32	0,96	2,39	1,14

Nota: Dados analisados (D.A.); Dados da reanálise (D.R.); Dados observados (D.O.).

Tabela 3.10: Estatísticas com dados de velocidade do vento (m s^{-1}) — Médias móveis de 5h para os dados da rede Cemig

Estação	D.A.	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.R.)	σ (D.R.)	\bar{x} (D.O.)	σ (D.O.)
Bocaiúva 1003	35.851	-0,29	1,10	1,48	0,15	2,76	1,04	3,05	1,18
Buritzeiro 1005	94.387	-0,30	0,90	1,16	0,36	2,14	0,89	2,44	1,07
Curvelo 1008	22.256	0,09	0,75	0,95	0,44	2,29	0,94	2,20	0,83
Diamantina 1009	23.906	-1,09	1,23	1,56	0,52	2,28	0,83	3,37	1,30
Uberaba 1010	25.701	-0,41	0,87	1,13	0,55	2,38	1,02	2,79	1,17
Igicatu 1013	63.822	-0,43	0,76	0,94	0,45	1,94	0,89	2,37	0,65
Januária 1015	23.687	0,64	1,00	1,25	0,39	2,43	0,98	1,78	0,95
Nova Ponte 1017	59.121	0,01	1,02	1,30	0,41	2,58	1,09	2,57	1,30
Prata 1021	26.377	-0,72	1,08	1,40	0,53	2,33	0,98	3,05	1,38
Salinas 1023	37.070	0,18	0,88	1,08	0,48	2,53	0,93	2,34	1,13
SE Curvelo 1030	58.515	-0,54	0,95	1,21	0,51	2,13	0,92	2,68	1,20
SE Diamantina 1031	81.437	-0,26	0,76	0,98	0,48	2,32	0,88	2,58	0,97
SE Ituiutaba 1033	47.911	0,14	0,80	1,01	0,50	2,23	0,98	2,09	1,02
SE Januária 1034	80.439	-0,03	0,80	1,01	0,51	2,40	1,02	2,43	1,02
SE Montes Claros 1037	40.256	1,10	1,24	1,50	0,48	2,65	1,09	1,55	0,90
SE Uberaba 1041	66.768	0,07	0,75	0,95	0,54	2,30	1,02	2,23	0,96
Sete Lagoas 1043	18.710	0,06	0,80	1,01	0,41	2,30	0,94	2,24	0,92
Média	48.147	-0,09	0,91	1,15	0,47	2,33	0,96	2,42	1,05

Nota: Dados analisados (D.A.); Dados da reanálise (D.R.); Dados observados (D.O.).

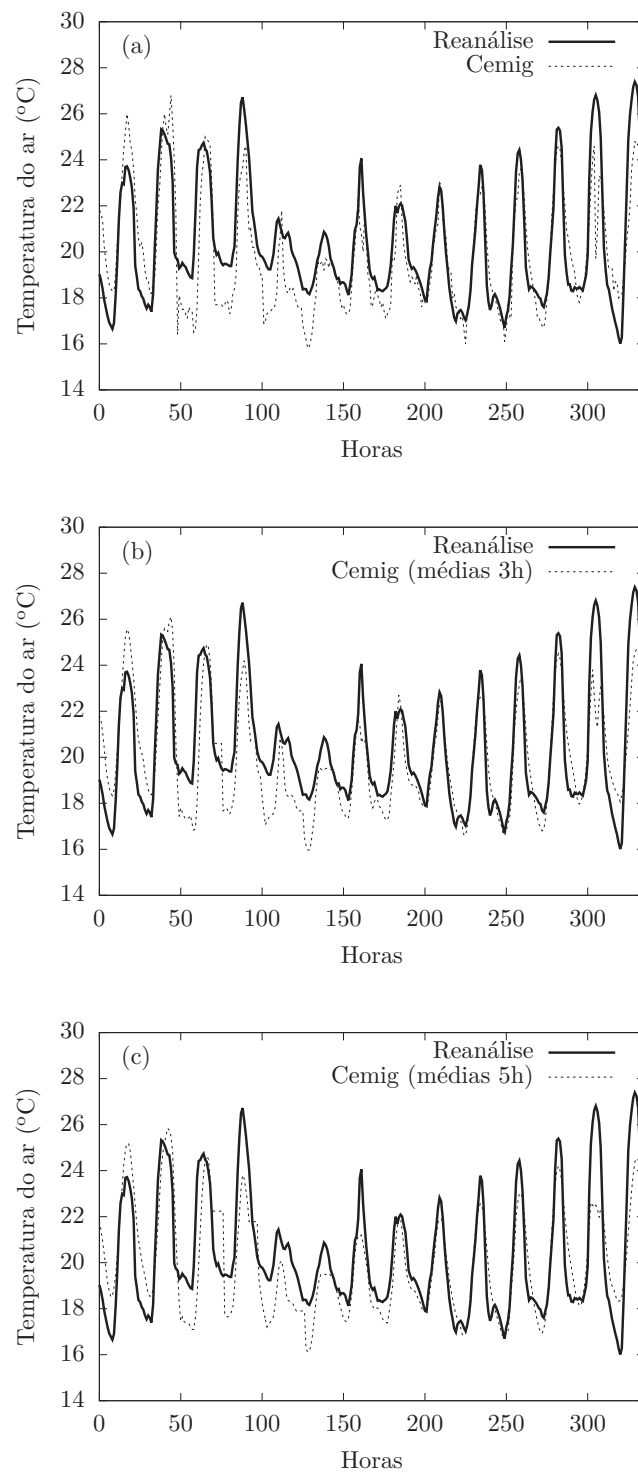


Figura 3.4: Comparação entre séries temporais de temperatura do ar para a estação 1031 — Período de 01 a 14 de janeiro de 2009: (a) Reanálise *versus* Cemig; (b) Reanálise *versus* Médias móveis de 3h para os dados da rede Cemig; (c) Reanálise *versus* Médias móveis de 5h para os dados da rede Cemig.

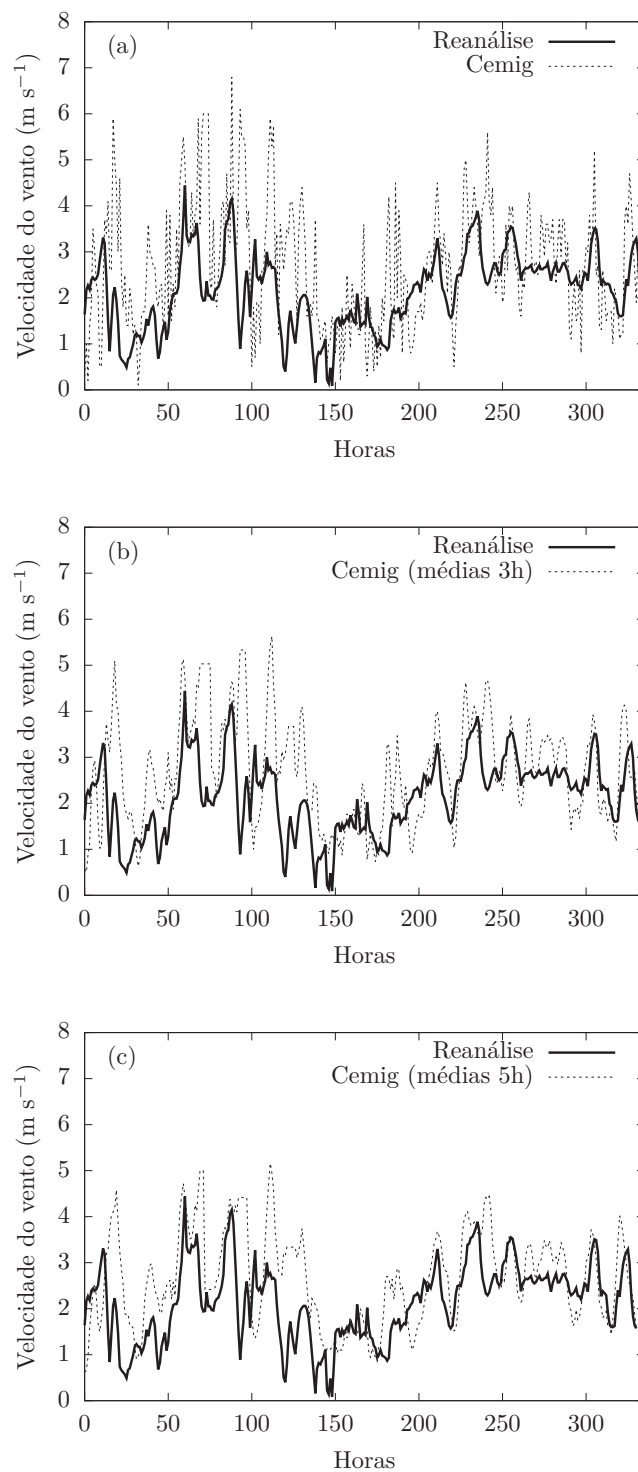


Figura 3.5: Comparação entre séries temporais de velocidade do vento para a estação 1031 — Período de 01 a 14 de janeiro de 2009: (a) Reanálise *versus* Cemig; (b) Reanálise *versus* Médias móveis de 3h para os dados da rede Cemig; (c) Reanálise *versus* Médias móveis de 5h para os dados da rede Cemig.

Capítulo 4

Avaliação de métodos de estimativas da velocidade do vento

Este capítulo contém os resultados obtidos nos estudos realizados na aplicação dos métodos para estimar a velocidade do vento. São apresentadas algumas funções de similaridade de Monin-Obukhov para uso no cálculo da estimativa de velocidade do vento em níveis acima de 10 m. Indica-se o local de estudo e os dados utilizados. Também são descritos os resultados obtidos aplicando as técnicas para estimar o comprimento de rugosidade. Verificam-se as aplicações e comparações das estimativas de velocidade do vento utilizando a função logarítmica e mais dois métodos que utilizam as funções de correção de estabilidade.

Serão apresentados três estudos de estimativa da velocidade do vento em níveis acima de 10 metros. O ESTUDO 1 consiste em analisar as estimativas obtidas com a fórmula do perfil logarítmico (Equação (2.11)). O ESTUDO 2 consiste em analisar as estimativas obtidas com a aplicação dos dados na Equação (2.18). Nesse estudo, primeiramente são utilizadas as funções de correção de estabilidade das classes instável e estável sugeridas por Businguer-Dyer, as quais serão definidas na próxima seção. Posteriormente são analisadas as estimativas obtidas com a aplicação das funções de correção de estabilidade da classe estável sugeridas por Cheng-Brutsaert e Grachev et. al., as quais serão definidas na próxima seção. Por fim, o ESTUDO 3 consiste em analisar as estimativas obtidas com a aplicação dos dados na Equação (2.15). Nesse estudo, a função de correção de estabilidade da classe instável é a sugerida por Businguer-Dyer e a função de correção de estabilidade da classe estável é a sugerida por Cheng e Brutsaert.

4.1 Algumas formulações existentes da função de estabilidade atmosférica

Diversas formulações de ϕ_r para diferentes intervalos de ζ são relatadas na literatura. As formulações são normalmente obtidas a partir de experimentos com medições das di-

versas grandezas em torres micrometeorológicas. Uma formulação geral bastante aceita é

$$\phi_\tau = \begin{cases} 1 + \lambda\zeta, & \zeta > 0 \\ (1 - \gamma\zeta)^{-\frac{1}{4}}, & \zeta < 0 \end{cases}, \quad (4.1)$$

onde λ e γ são constantes que fornecem uma boa descrição dos dados disponíveis. Diversos valores foram estabelecidos para λ e γ através de estudos importantes feitos por Dyer (1974), Businger et al. (1971), Wieringa (1980), Högström (1988), entre outros.

Em relação às fórmulas clássicas do gradiente adimensional ϕ_τ , optou-se por utilizar neste trabalho as relações apresentadas por Businger-Dyer. Estas relações talvez sejam as mais utilizadas e podem ser encontradas, por exemplo, em Kaimal e Finnigan (1994).

Businger-Dyer sugerem para condições instáveis ($\zeta < 0$)

$$\phi_\tau = (1 - 16\zeta)^{-\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

e, para condições estáveis ($\zeta > 0$),

$$\phi_\tau = 1 + 5\zeta. \quad (4.3)$$

Resolvendo a integral da Equação (2.19) para $\zeta < 0$ obtém-se

$$\Psi(\zeta) = \ln\left(\frac{q^2 + 1}{2}\right) + 2 \ln\left(\frac{q + 1}{2}\right) - 2 \arctan(q) + \frac{\pi}{2}, \quad (4.4)$$

onde $q = (1 - 16\zeta)^{\frac{1}{4}}$. Resolvendo a integral da Equação (2.19) para $\zeta > 0$ obtém-se

$$\Psi(\zeta) = -5\zeta. \quad (4.5)$$

Para condições estáveis a função ϕ_τ aumenta linearmente com ζ . No entanto, foi observado que isso ocorre até um limite do parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov. Após esse limite de transição a função deveria gradualmente se aproximar de uma constante. Assim, outras formulações para condições estáveis foram propostas. Por exemplo Cheng e Brutsaert (2005) sugerem uma função adimensional do gradiente de velocidade do vento que tem a seguinte forma

$$\phi_\tau = 1 + s \left(\frac{\zeta + \zeta^m (1 + \zeta^m)^{\frac{1-m}{m}}}{\zeta + (1 + \zeta^m)^{\frac{1}{m}}} \right). \quad (4.6)$$

Resolvendo a integral da Equação (2.19) para a nova função proposta de ϕ_τ obtém-se

$$\Psi(\zeta) = -s \ln \left[\zeta + (1 + (\zeta)^m)^{\frac{1}{m}} \right], \quad (4.7)$$

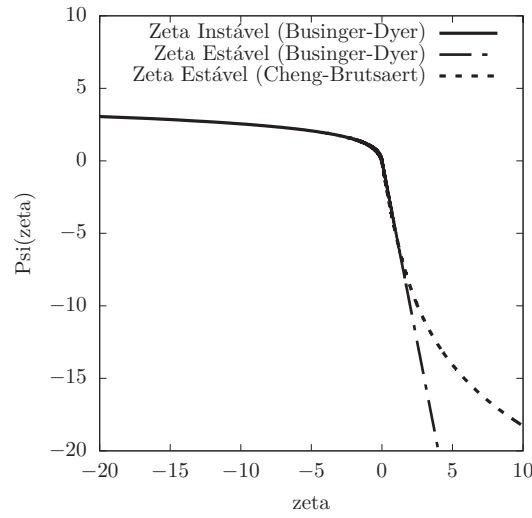


Figura 4.1: Uma comparação entre as funções de estabilidade sugeridas por Businger-Dyer e Cheng-Brutsaert

onde os autores sugerem $s = 6,1$ e $m = 2,5$.

A Figura 4.1 mostra o comportamento de ζ versus $\psi(\zeta)$ com o propósito de comparar as funções de estabilidade sugeridas por Businger-Dyer e Cheng-Brutsaert. É possível visualizar uma diferença significativa na utilização da função de estabilidade atmosférica sugerida por Cheng e Brutsaert para a classe estável comparada com a relação de Businger-Dyer. Para a relação sugerida por Businger-Dyer os valores de $\Psi(\zeta)$ tendem a diminuir rapidamente implicando em uma estimativa da velocidade do vento maior do que quando se utiliza a relação sugerida por Cheng e Brutsaert, onde os valores de $\Psi(\zeta)$ tendem a diminuir mais lentamente.

Outra proposta encontrada é a de Grachev et al. (2007) . A sugestão para ϕ_τ é

$$\phi_\tau = 1 + \frac{c\zeta(1 + \zeta)^{\frac{1}{3}}}{1 + d\zeta}, \quad (4.8)$$

Resolvendo a integral da Equação (2.19) para esta última função proposta de ϕ_τ obtém-se

$$\Psi(\zeta) = -\frac{3c}{d}(x - 1) + \frac{cB}{2d} \left[2 \ln \frac{x + B}{1 + B} - \ln \frac{x^2 - xB + B^2}{1 - B + B^2} + 2\sqrt{3} \left(\arctan \frac{2x - B}{\sqrt{3}B} - \arctan \frac{2 - B}{\sqrt{3}B} \right) \right], \quad (4.9)$$

onde $c = 5$, $d = \frac{c}{6,5}$, $x = (1 + \zeta)^{(1/3)}$ e $B = \left(\frac{1-d}{d}\right)^{(1/3)}$.

Ainda não existe um consenso claro sobre as melhores formas para ϕ_τ . Um estudo com todas as formulações já propostas demandaria bastante esforço e tempo disponível.

Mas certamente esta questão merece mais estudos e discussões.

4.2 Área de estudo e dados utilizados

Para os estudos de estimativa da velocidade do vento foi empregado um conjunto de dados constituído por séries provenientes de uma torre metálica treliçada de 100 metros de altura. Essa torre faz parte da rede de estações meteorológicas de superfície da CEMIG. A torre está equipada com instrumentos de medição a diferentes alturas. Ela possui anemômetros do modelo *Thies First Class Advanced* a 100, 80 e 50 metros. Na altura de 8 metros a torre contém um sensor de temperatura/umidade relativa do ar e um sensor de pressão atmosférica. A partir de agora essa torre será nomeada como TORRE P1. Essa torre está situada no município de Bocaiuva em Minas Gerais a cerca de 400 km da capital Belo Horizonte. A localização da TORRE P1 pode ser observada na Figura (4.2).

Os dados disponibilizados são horários e correspondem às médias calculadas a cada hora com base nos dados originais que foram registrados a cada 10 minutos. O período de estudo vai de 24/05/2012 a 03/02/2014. As séries de dados apresentam falhas de medição, não apresentando todos os valores das variáveis meteorológicas. O total de dados disponíveis é 12.328. Para calcular a estimativa da velocidade do vento os horários de transição do nascer e pôr do sol foram descartados (05:00–7:00 e 17:00–19:00) porque nestes períodos a camada limite encontra-se em transição de estável para instável e vice-versa, podendo apresentar características distintas e não bem definidas em relação as condições de estabilidade atmosférica. O total de dados analisados é 9.244; desses dados, 4.735 fazem parte da classe de condições estáveis e 4.509 fazem parte da classe de condições instáveis.

Para o cálculo de u_* e de θ_* foram utilizados os dados de fluxo de momentum (τ) e fluxo de calor sensível na superfície (H) da reanálise. Foram utilizados os dados disponíveis da TORRE P1 para o cálculo de $\bar{\rho}$ e c_p que dependem da pressão atmosférica, da umidade específica, da temperatura do ar e demais variáveis. Também poderiam ser utilizados os dados de reanálise para essas últimas variáveis citadas, sendo isso apenas uma questão de escolha do analista.

Para o cálculo da variável adimensional de estabilidade (ζ) foram utilizados os dados que acabaram de serem definidos. Esses dados entram na fórmula como valores originais desses parâmetros, definindo um ζ para cada hora analisada. Com a obtenção de ζ basta aplicá-lo na função de estabilidade atmosférica para fazer a correção do perfil logarítmico para casos de estratificação não neutra.

Também foram utilizados dados de velocidade do vento a 10 metros de altura e dados de comprimento de rugosidade vindos da reanálise. Para mais detalhes sobre a justificativa da escolha dos dados de velocidade do vento de 10 m vindos da reanálise e não, por exemplo, de estações de superfície próximas à TORRE P1 ver o Apêndice A.



Figura 4.2: Vista do local de instalação da TORRE P1 em Minas Gerais

Todos os dados de reanálise utilizados nesta avaliação foram elaborados a partir do modelo CFSV2.

4.3 Aplicação de técnicas para estimar o comprimento de rugosidade

Nesta seção é possível verificar os resultados encontrados para o comprimento de rugosidade, obtidos pela aplicação dos métodos que constam na Seção 2.4.

É necessário analisar um conjunto de dados comum a todos os métodos a fim de obter comparações justas dos resultados; as comparações serão descritas mais adiante nas Seções 4.4 e 4.6. Os dados comuns a todos os métodos são os que pertencem à classe de estabilidade próxima da neutra. Desta forma, foram utilizados apenas os dados que possuem valores de $|\xi_{10}| < 0,0325$.

Inicialmente foi aplicado o método da Equação (2.20) em quatro níveis de medição z_{10} , z_{50} , z_{80} e z_{100} . Um total de 1.400 perfis de velocidade do vento foram analisados e utilizados para o cálculo de z_0 . Em alguns casos foram obtidos valores de z_0 muito eleva-

Tabela 4.1: Alguns exemplos de perfis de velocidade do vento na forma padrão

Perfis de vento	u_{10}	u_{50}	u_{80}	u_{100}
Perfil 1	2,8	6,9	7,9	8,2
Perfil 2	2,4	4,9	5,5	5,9
Perfil 3	1,7	3,7	4,2	4,4
Perfil 4	3,1	7,4	8,2	8,6
Perfil 5	3,2	5,6	6,7	7,4
Perfil 6	4,6	8,7	9,6	10,1

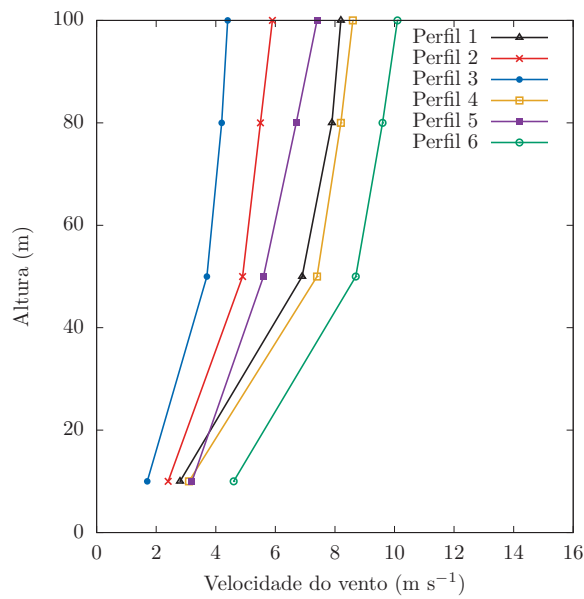


Figura 4.3: Alguns exemplos de perfis de velocidade do vento na forma padrão

dos. Esses casos, e perfis de velocidade associados, foram avaliados individualmente. A conclusão foi de que esses valores aconteceram nos casos em que o perfil da velocidade do vento não seguia o típico crescimento com a altura. Na Tabela 4.1 constam alguns exemplos de perfis de velocidade do vento que seguem o padrão esperado e na Figura 4.3 é possível visualizar que a velocidade do vento desses perfis aumentam monotonicamente com a altura. Na Tabela 4.2 constam alguns exemplos de perfis que geraram valores absurdos para z_0 e na Figura 4.4 é possível visualizar que esses perfis não seguem o padrão esperado, ou seja, a velocidade do vento não aumenta monotonicamente com a altura.

Assim, mais um critério foi adotado. Agora, além de pertencerem à classe de estabilidade $|\zeta_{10}| < 0,0325$, os dados a serem analisados também devem satisfazer à seguinte relação:

$$\overline{u_{10}} < \overline{u_{50}} < \overline{u_{80}} < \overline{u_{100}}. \quad (4.10)$$

Isso garante que a velocidade do vento seja crescente com a altura. De 1.400 perfis de

Tabela 4.2: Alguns exemplos de perfis de velocidade do vento fora do padrão esperado

Perfis de vento	u_{10}	u_{50}	u_{80}	u_{100}
Perfil 1	3,2	3,0	3,1	3,2
Perfil 2	2,2	1,6	1,5	1,6
Perfil 3	4,9	3,8	4,7	5,3
Perfil 4	1,6	2,8	1,9	1,5
Perfil 5	2,9	0,9	0,7	0,6
Perfil 6	1,8	1,6	1,7	1,7

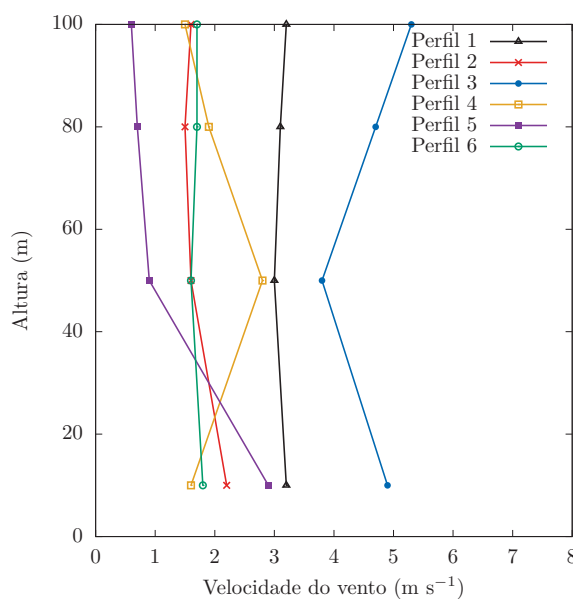


Figura 4.4: Alguns exemplos de perfis de velocidade do vento fora do padrão esperado

velocidade do vento analisados foram eliminados 145, resultando em um total de 1.255 perfis de velocidade do vento a serem utilizados no cálculo do comprimento de rugosidade.

Com o novo conjunto de dados aplicou-se o método da Equação (2.20) primeiramente em quatro níveis de medição z_{10} , z_{50} , z_{80} e z_{100} . Este mesmo método foi aplicado novamente em dois níveis de medição z_{10} e z_{50} . Nessas duas alturas também foi aplicado o método da Equação (2.27), que depende de dois níveis de medição.

Os demais métodos devem ser aplicados para cada altura individualmente, ou seja, apenas um nível de medição é necessário. Os níveis escolhidos para serem aplicados individualmente foram z_{10} e z_{50} , sendo aplicados para cada uma das equações: Equação (2.29), Equação (2.30) e Equação (2.31). Para cada uma dessas equações foram obtidos dois resultados médios de z_0 .

As séries de dados de reanálise também contêm um conjunto de dados de z_0 . Estes dados também foram analisados e com eles foi possível obter um valor médio para z_0 .

Na Tabela 4.3 é possível verificar todos os valores médios estimados de z_0 obtidos

Tabela 4.3: Valores estimados do comprimento de rugosidade

Método/Equação	Alturas utilizadas	Valor médio de z_0 (m)
Equação (2.20)	z_{10} , z_{50} , z_{80} , z_{100}	1,33
Equação (2.20)	z_{10} , z_{50}	0,90
Equação (2.27)	z_{10} , z_{50}	0,89
Equação (2.29)	z_{10}	0,66
Equação (2.29)	z_{50}	0,13
Equação (2.30)	z_{10}	0,68
Equação (2.30)	z_{50}	0,15
Equação (2.31)	z_{10}	0,05
Equação (2.31)	z_{50}	0,69
Dados de reanálise	z_{10}	0,86

pelos métodos mencionados. Os valores encontram-se entre 0,05 e 1,37 metro. Esses valores de comprimento de rugosidade serão testados na seção 4.4 e na seção 4.6, onde serão aplicados para obter estimativas da velocidade do vento em níveis acima de 10 m.

Já adiantando, o comprimento de rugosidade que produz melhores resultados para a previsão da velocidade é $z_0 = 0,15$, que foi obtido com a Equação (2.30). Para este método optou-se por fazer uma análise sobre a direção do vento. As direções de vento foram separadas em quatro setores: Noroeste – Nordeste (NO – SE), Nordeste – Sudeste (NE – SE), Sudeste – Sudoeste (SE – SO), Sudoeste – Noroeste (SO – NO). Os dados de direção do vento são da altura de 80 metros e foram disponibilizados pela rede Cemig. Não haviam dados disponíveis de direção do vento para a altura de 50 m. A direção predominante do vento em um determinado local deve ser praticamente a mesma independente da altura acima do solo analisada (na Camada Superficial).

Na Tabela 4.4 é possível verificar que a direção predominante do vento é NO – NE. Para esta direção os dados analisados geram um comprimento de rugosidade de 0,15 m. Portanto, utilizar o comprimento de $z_0 = 0,15$ para todos os dados analisados não gera grandes perdas.

Tabela 4.4: Análise da direção do vento

Direção do vento	Número de dados analisados	z_0 estimado (m)
NO – NE	1.139	0,15
NE – SE	12	0,20
SE – SO	17	0,90
SO – NO	87	0,22

4.4 Estimativa da velocidade do vento: ESTUDO 1 — Resultados e Discussão

O ESTUDO 1 para estimar a velocidade do vento em níveis superiores a 10 metros baseou-se na Equação (2.11), ou seja, a função do perfil logarítmico dada por

$$\bar{u}_{50} = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z_{50}}{z_0} \right),$$

onde \bar{u}_{50} é a velocidade média do vento que será estimada para a altura de 50 m, u_* é a velocidade de atrito obtida através dos dados de reanálise e de dados da TORRE P1, $k = 0,4$ é a constante de von Kármán, z_{50} representa a altura de 50 m para a qual será estimada a velocidade do vento e z_0 é o comprimento de rugosidade. Destaca-se que neste estudo não foram utilizados dados de velocidade do vento a 10 m de altura.

Para a escolha do valor do comprimento de rugosidade a ser utilizado foi feita uma comparação da estimativa da velocidade do vento utilizando os valores de z_0 obtidos na Seção 4.3. Os resultados dos índices estatísticos calculados podem ser observados na Tabela 4.5. É possível verificar que o viés decresce (em módulo) enquanto z_0 diminui até 0,13 m. Verifica-se que quando o valor de z_0 diminui de 1,33 m até 0,68 m o erro médio absoluto também diminui, de $z_0 = 0,68$ m até $z_0 = 0,15$ m o erro médio absoluto se mantém o mesmo e a partir de $z_0 = 0,15$ m até $z_0 = 0,05$ m o erro médio absoluto aumenta lentamente. É fácil perceber que quando o valor de z_0 diminui de 1,33 m até 0,15 m a raiz do erro quadrático médio também diminui, enquanto que a partir de 0,15 m até 0,05 m a raiz do erro médio quadrático aumenta. Quanto ao coeficiente de correlação pode-se observar que ele se mantém praticamente o mesmo para todos os valores de z_0 . As diferenças nas estatísticas são pequenas devido ao fato de que a equação para estimar a velocidade do vento utiliza o termo $\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$, e não diretamente z_0 .

Na Figura 4.5 é possível visualizar melhor o EMA e a REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso dos diferentes comprimentos de rugosidade. Pode-se verificar o leve decrescimento de ambos os erros analisados até $z_0 = 0,15$ m e logo depois o leve crescimento.

Levando em consideração o conjunto de resultados apresentados, optou-se por utilizar $z_0 = 0,15$ m por se tratar de um valor que gera erros menores na estimativa da velocidade do vento.

Com a escolha de z_0 o próximo passo foi explorar mais o conjunto de dados verificando sua dispersão e analisando as estimativas por classes de estabilidade. Na Figura 4.6 é possível verificar os gráficos obtidos plotando a velocidade do vento observada *versus* a velocidade do vento estimada. As novas análises foram feitas em três conjuntos de dados

Tabela 4.5: Estimativa da velocidade do vento com o perfil logarítmico (m s^{-1}) — Analisando z_0

z_0	Viés	EMA	REQM	r
1,33 m	-2,61	2,93	3,75	0,3022
0,90 m	-2,22	2,77	3,54	0,3023
0,89 m	-2,21	2,76	3,54	0,3021
0,86 m	-2,18	2,75	3,52	0,3025
0,69 m	-1,96	2,69	3,42	0,3026
0,68 m	-1,94	2,68	3,42	0,3024
0,66 m	-1,91	2,68	3,41	0,3023
0,15 m	-0,45	2,68	3,22	0,3024
0,13 m	-0,30	2,71	3,24	0,3024
0,05 m	0,64	3,01	3,58	0,3024

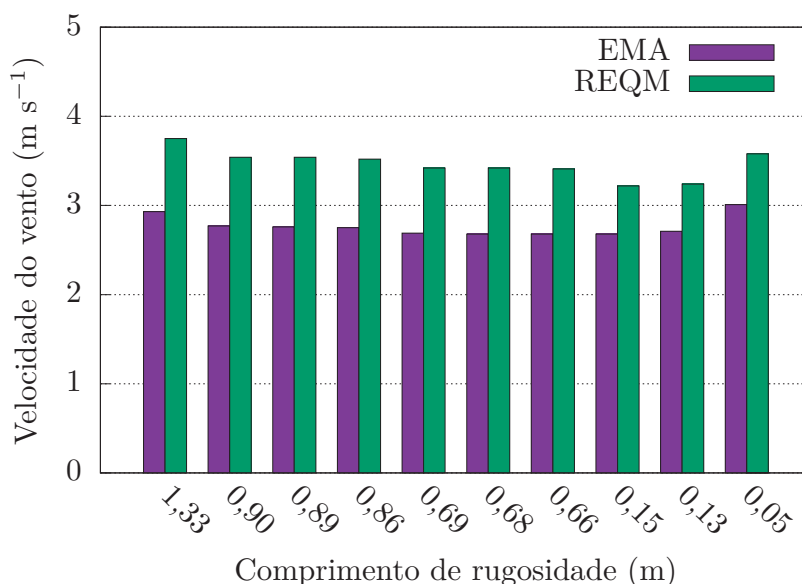


Figura 4.5: EMA e REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso de diferentes comprimentos de rugosidade — ESTUDO 1

e representadas nas figuras separadamente. A Figura 4.6(a) e a Figura 4.6(b) apresentam a análise feita com todos os dados das classes de estabilidade instável e estável. A Figura 4.6(c) e a Figura 4.6(d) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade estável. A Figura 4.6(e) e a Figura 4.6(f) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade instável.

Na Figura 4.6(a) observa-se a dispersão dos dados analisados. Com os *boxplots* da Figura 4.6(b) é possível verificar uma tendência de superestimação e subestimação para alguns valores da velocidade do vento. A superestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 0 m s^{-1} e 6 m s^{-1} . A subestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 6 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Tabela 4.6: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento usando o perfil logarítmico (m s^{-1}) — Com $z_0 = 0,15 \text{ m}$

Classes de estabilidade	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.E)	σ (D.E)	\bar{x} (D.O)	σ (D.O)
Estável e Instável	-0,45	2,68	3,22	0,30	5,76	2,73	6,20	2,66
Estável	-2,50	3,02	3,58	0,48	4,66	2,38	7,16	2,64
Instável	1,72	2,33	2,78	0,61	6,92	2,60	5,20	2,28

Nota: Dados estimados (D.E); Dados observados (D.O).

Para a classe estável, observa-se na Figura 4.6(c) a dispersão dos dados analisados. Com os *boxplots* da Figura 4.6(d) verifica-se uma superestimação da velocidade do vento principalmente para valores entre 0 m s^{-1} e 2 m s^{-1} . Também é possível verificar uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 4 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

A dispersão dos dados analisados da classe instável pode ser observada na Figura 4.6(e). Com os *boxplots* da Figura 4.6(f) verifica-se a ocorrência de valores de velocidade do vento superestimados principalmente entre 0 m s^{-1} e 8 m s^{-1} . Também verifica-se uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 10 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Os resultados dos índices estatísticos calculados para a comparação entre os dados observacionais e as estimativas de velocidade do vento utilizando a Equação (2.11) com $z_0 = 0,15 \text{ m}$ estão presentes na Tabela 4.6. Para o conjunto total de dados, verifica-se um EMA de $2,68 \text{ m s}^{-1}$, uma REQM de $3,22 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,30. Observa-se na classe estável um desvio padrão menor nos dados estimados do que nos dados observacionais; verifica-se ainda uma REQM de $3,58 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,48. Para a classe instável verifica-se um desvio padrão maior nos dados estimados do que nos dados observacionais; observa-se também um valor de $2,78 \text{ m s}^{-1}$ para a REQM e um coeficiente de correlação de 0,61. Para o conjunto total de dados e para a classe estável o viés apresentou valores negativos indicando uma subestimação na estimativa da velocidade do vento. Para a classe instável o viés é positivo indicando uma superestimação.

Considerando o conjunto de resultados apresentados para o ESTUDO 1, vê-se claramente que o melhor resultado de estimativa de velocidade do vento se deu para a classe instável. É importante salientar que a função logarítmica forneceu resultados com erros grandes para a estimativa da velocidade do vento.

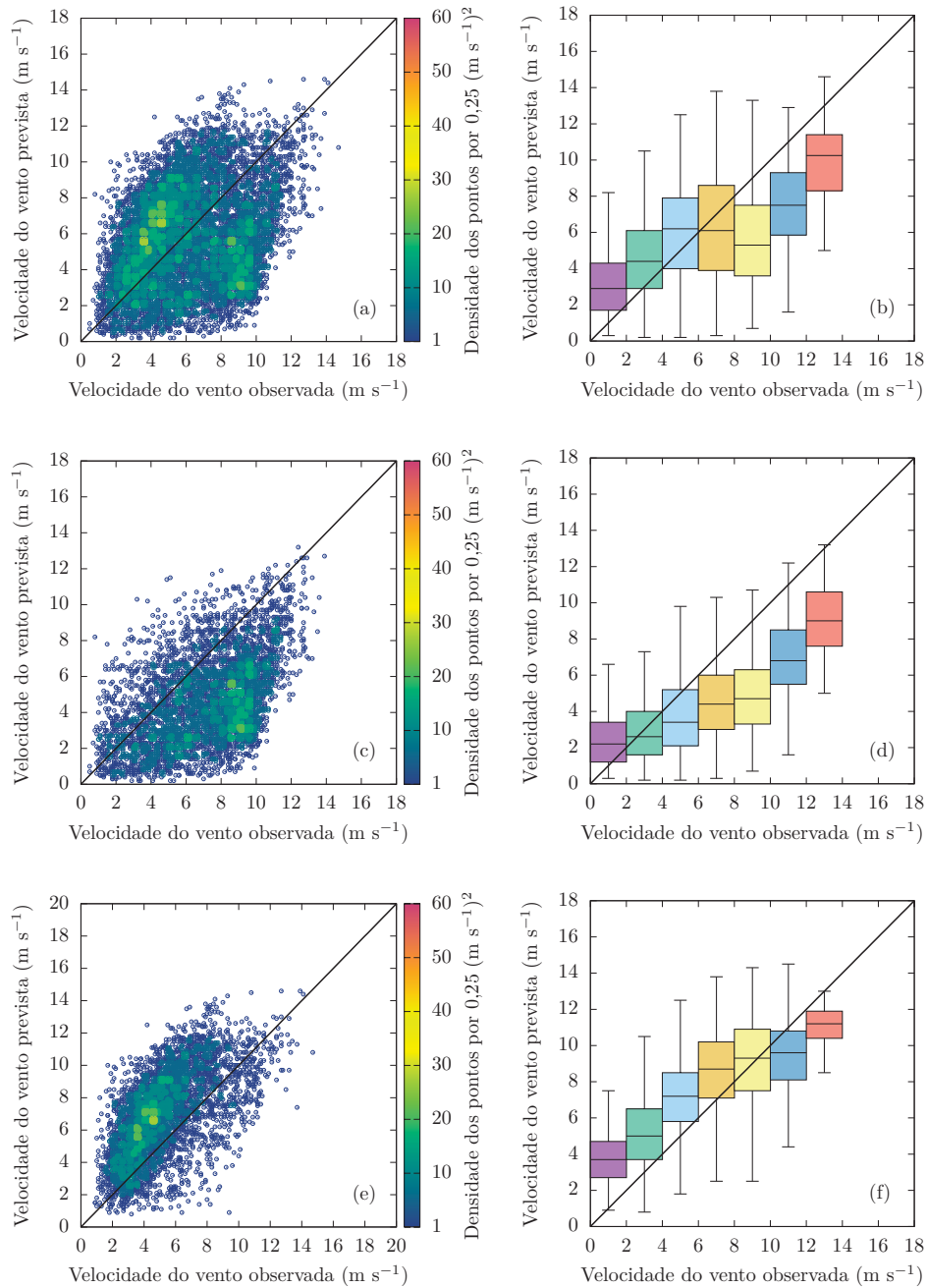


Figura 4.6: Estimativa da velocidade do vento para 50 m de altura (ESTUDO 1): (a) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).

4.5 Estimativa da velocidade do vento: ESTUDO 2 — Resultados e Discussão

Nesta seção buscou-se fazer uma análise comparativa a partir dos dados de velocidade do vento medidos na TORRE P1 na altura de 50 metros comparando com as estimativas de velocidade do vento geradas com a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov.

O ESTUDO 2 para estimar a velocidade do vento em níveis superiores a 10 metros baseou-se na Equação (2.18) a qual aplicada para a velocidade do vento a 50 m fica

$$\bar{u}_{50} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{50}}{z_{10}} \right) - \Psi(\zeta_{50}) + \Psi(\zeta_{10}) \right] + \bar{u}_{10},$$

onde \bar{u}_{50} é a velocidade média do vento que será estimada para a altura de 50 m, u_* é a velocidade de atrito obtida através dos dados de reanálise e de dados da TORRE P1, $k = 0,4$ é a constante de von Kármán, z_{50} e z_{10} representam as alturas de 50 m e de 10 m respectivamente, ζ_{50} e ζ_{10} são as variáveis adimensionais de estabilidade de Monin-Obukhov para as alturas de 50 m e de 10 m respectivamente (também obtidas através dos dados de reanálise e de dados da TORRE P1), Ψ é a função da estabilidade atmosférica que depende de ζ e, por fim, \bar{u}_{10} é a velocidade média do vento na altura de 10 m.

Primeiramente foram utilizadas as funções de estabilidade atmosférica sugeridas por Businger-Dyer da Equação (4.4) para a classe instável e da Equação (4.5) para a classe estável.

Na Figura 4.7 é possível verificar os gráficos obtidos plotando a velocidade do vento observada *versus* a velocidade do vento estimada. As análises foram feitas em três conjuntos de dados e representadas nas figuras separadamente. A Figura 4.7(a) e a Figura 4.7(b) apresentam a análise feita com todos os dados das classes de estabilidade instável e estável. A Figura 4.7(c) e a Figura 4.7(d) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade estável. A Figura 4.7(e) e a Figura 4.7(f) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade instável.

Na Figura 4.7(a) é possível observar a dispersão dos dados analisados. Com os *boxplots* da Figura 4.7(b) verifica-se uma tendência de superestimação e subestimação para alguns valores de velocidade do vento. A superestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 0 m s^{-1} e 2 m s^{-1} . A subestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 6 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Para a classe estável, pode-se observar a dispersão dos dados analisados na Figura 4.7(c). Com os *boxplots* da Figura 4.7(d) é possível verificar uma tendência de superestimação e subestimação para alguns valores de velocidade do vento. A superestimação ocorre principalmente para valores de velocidade entre 0 m s^{-1} e 6 m s^{-1} e a subestimação

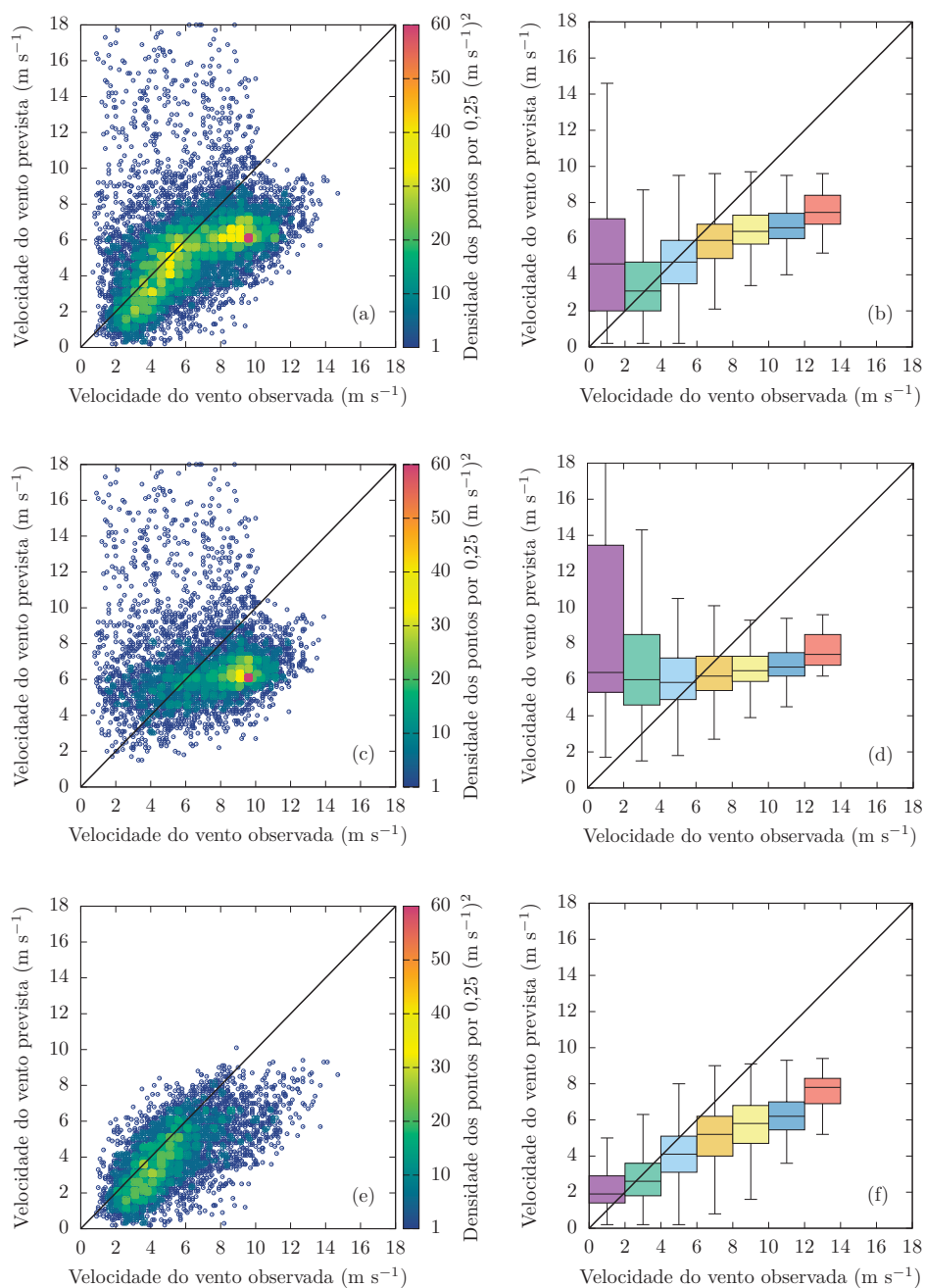


Figura 4.7: Estimativa da velocidade do vento para 50 m a partir do conhecimento da velocidade do vento a 10 m de altura (ESTUDO 2 — parte 1): (a) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).

Tabela 4.7: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Estudo 2 (parte 1)

Classes de estabilidade	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.E)	σ (D.E)	\bar{x} (D.O)	σ (D.O)
Estável e Instável	-0,57	2,33	3,79	0,25	5,64	3,40	6,20	2,66
Estavel	-0,02	3,04	4,88	-0,11	7,14	3,84	7,16	2,64
Instavel	-1,14	1,59	2,10	0,65	4,06	1,83	5,20	2,28

Nota: Dados estimados (D.E); Dados observados (D.O).

ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 6 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Para a classe instável, observa-se na Figura 4.7(e) a dispersão dos dados analisados. Na Figura 4.7(f) é possível verificar através dos *whiskers* que a variabilidade dos dados de velocidade do vento no intervalo de 0 m s^{-1} a 4 m s^{-1} é menor do que nas Figuras 4.7(b) e 4.7(d) para o mesmo intervalo. A tendência de superestimação e subestimação para alguns valores de velocidade do vento ainda estão presentes. É possível observar que ocorre uma superestimação principalmente para valores de velocidade entre 0 m s^{-1} e 2 m s^{-1} . Também verifica-se uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 4 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Os resultados dos índices estatísticos calculados para a comparação entre os dados observacionais e as estimativas de velocidade do vento estão presentes na Tabela 4.7. Verificou-se na classe estável um desvio padrão maior nos dados estimados do que nos dados observacionais. Observa-se ainda uma REQM de $4,88 \text{ m s}^{-1}$ e uma correlação quase nula ($-0,11$). Para a classe instável verifica-se um desvio padrão menor nos dados estimados do que nos dados observacionais. Observa-se também um valor de $2,10 \text{ m s}^{-1}$ para a REQM e uma correlação de $0,65$. Em todos os casos o viés apresentou valores negativos indicando uma subestimação na estimativa da velocidade do vento.

Os resultados dessa análise mostram uma estimativa de velocidade do vento ruim principalmente para os dados da classe estável. O próximo passo foi analisar essa classe de estabilidade com outras formulações de ϕ_τ com o intuito de diminuir os erros nas estimativas.

A estimativa da velocidade do vento foi feita utilizando as funções de estabilidade da Equação (4.7) e da Equação (4.9) para a classe estável. Na Tabela 4.8 é possível verificar que a utilização da formulação sugerida por Cheng e Brutsaert (2005) (Equação (4.7)) implica em resultados melhores para o conjunto de dados analisados. O viés, o EMA e a REQM são menores e o coeficiente de correlação é maior quando se utiliza essa formulação.

Assim, as formulações de ϕ_τ que definem o ESTUDO 2 são as relações de Businger-Dyer para a classe instável e as relações de Cheng e Brutsaert para a classe estável. Na Figura 4.8 é possível verificar os gráficos obtidos plotando a velocidade do vento obser-

Tabela 4.8: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Classe Estável

Equação utilizada	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.E)	σ (D.E)	\bar{x} (D.O)	σ (D.O)
Equação (4.7)	-1,44	2,20	2,60	0,57	5,72	1,40	7,16	2,64
Equação (4.9)	-1,88	2,51	2,94	0,52	5,28	1,18	7,16	2,64

Nota: Dados estimados (D.E); Dados observados (D.O).

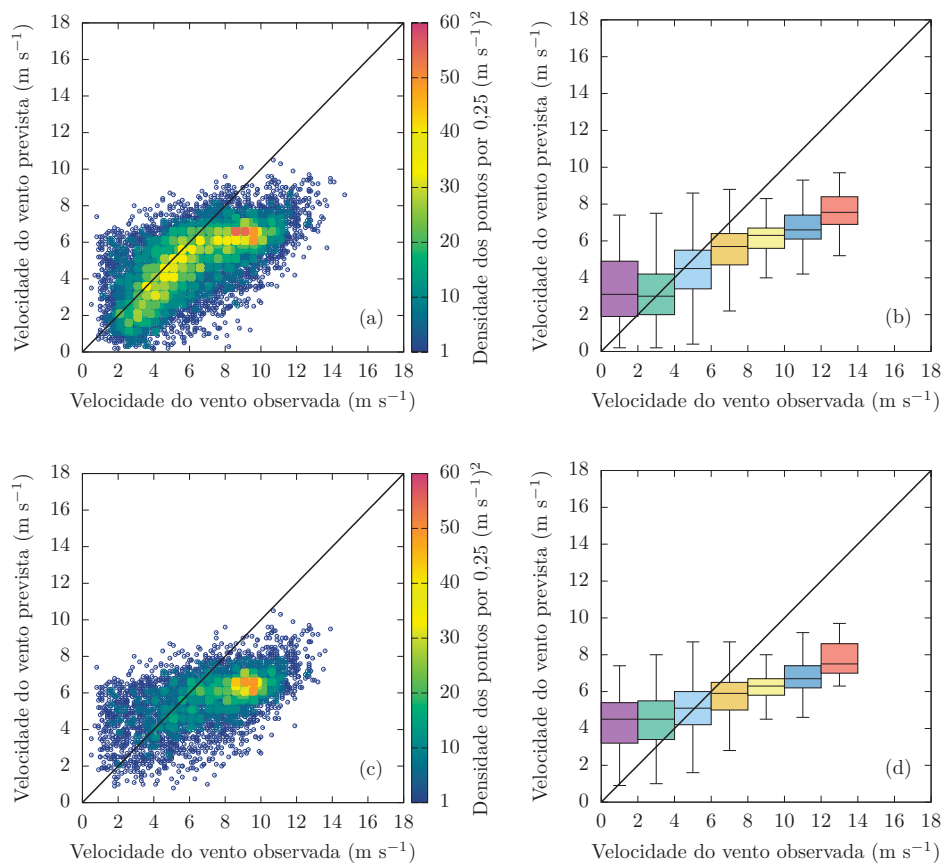


Figura 4.8: Estimativa da velocidade do vento para 50 m a partir do conhecimento da velocidade do vento a 10 m de altura (ESTUDO 2 — parte 2): (a) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável).

Tabela 4.9: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Estudo 2 (parte 2)

Classes de estabilidade	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.E)	σ (D.E)	\bar{x} (D.O)	σ (D.O)
Estável e Instável	-1,30	1,90	2,37	0,66	4,91	1,82	6,20	2,66
Estável	-1,44	2,20	2,60	0,57	5,72	1,40	7,16	2,64
Instável	-1,14	1,59	2,10	0,65	4,06	1,83	5,20	2,28

Nota: Dados estimados (D.E); Dados observados (D.O).

vada *versus* a velocidade do vento estimada com essas formulações. As análises foram feitas em dois conjuntos de dados e representadas nos gráficos separadamente. A Figura 4.8(a) e a Figura 4.8(b) apresentam a análise feita com todos os dados das classes de estabilidade instável e estável. A Figura 4.8(c) e a Figura 4.8(d) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade estável.

No gráfico da Figura 4.8(a) é possível observar a dispersão geral dos dados analisados. Com os *boxplots* da Figura 4.8(b) verifica-se que a tendência de superestimação ainda ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 0 m s^{-1} e 2 m s^{-1} . A subestimação também continua acontecendo principalmente para valores de velocidade do vento entre 4 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Para a classe estável, pode-se observar a dispersão dos dados analisados no gráfico da Figura 4.8(c). Com os *boxplots* da Figura 4.8(d) verifica-se que a tendência de superestimar e subestimar os dados de velocidade do vento ainda ocorre. A superestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 0 m s^{-1} e 4 m s^{-1} . A subestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 6 m s^{-1} e 14 m s^{-1} . A melhor estimativa aparentemente é para os valores de velocidade do vento entre 4 m s^{-1} e 6 m s^{-1} . É importante destacar que em geral os *whiskers* são menores do que aqueles que aparecem na Figura 4.7(d), isso indica que a variabilidade dos dados com a função de correção de estabilidade da Equação (4.7) é menor do que com a Equação (4.5) usada anteriormente.

Os resultados dos índices estatísticos calculados para a comparação entre os dados observacionais e as estimativas de velocidade do vento estão presentes na Tabela 4.9. Para o conjunto total de dados, verifica-se um EMA de $1,90 \text{ m s}^{-1}$, uma REQM de $2,37 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,66. Verificou-se na classe estável um desvio padrão maior nos dados observados do que nos dados estimados. Observa-se uma REQM de $2,60 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,57. Para a classe instável verifica-se um desvio padrão menor nos dados estimados do que nos dados observacionais. Observa-se também um valor de $2,10 \text{ m s}^{-1}$ para a REQM e um coeficiente de correlação de 0,65.

Como não houve nenhuma alteração na função da classe instável os gráficos e valores estatísticos dessa classe permanecem os mesmos já verificados nas Figuras 4.7(e) e 4.7(f)

e na Tabela 4.7.

Até o momento, o ESTUDO 2 foi o que proporcionou melhores resultados para os dados analisados. A alteração na classe estável possibilitou uma melhora nos resultados, ainda assim, considerando o conjunto de resultados apresentados vê-se claramente que a estimativa da velocidade do vento obteve melhor desempenho para a classe instável.

4.6 Estimativa da velocidade do vento: ESTUDO 3 — Resultados e Discussão

Nesta seção serão mostrados os resultados das análises do ESTUDO 3. Lembrando que se trata do estudo sobre a estimativa da velocidade do vento em níveis superiores a 10 metros baseada na Equação (2.15) a qual aplicada para a velocidade do vento a 50 m fica

$$\bar{u}_{50} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{50}}{z_0} \right) - \Psi(\zeta_{50}) \right],$$

onde \bar{u}_{50} é a velocidade média do vento que será estimada para a altura de 50 m, u_* é a velocidade de atrito obtida através dos dados de reanálise e de dados da TORRE P1, $k = 0,4$ é a constante de von Kármán, z_{50} representa a altura de 50 m para a qual será estimada a velocidade do vento, z_0 é o comprimento de rugosidade, ζ_{50} é a variável adimensional de estabilidade de Monin-Obukhov para a altura de 50 m (também obtida através dos dados de reanálise e de dados da TORRE P1) e Ψ é a função da estabilidade atmosférica que depende de ζ . É importante salientar que neste estudo não foram utilizados dados de velocidade do vento a 10 m de altura.

Para a escolha do valor do comprimento de rugosidade a ser utilizado foi feita uma comparação da estimativa da velocidade do vento utilizando os valores de z_0 obtidos na Seção 4.3. Os resultados dos índices estatísticos calculados podem ser observados na Tabela 4.10. É fácil perceber que quando o valor de z_0 diminui de 1,33 m até 0,15 m o viés (em módulo), o erro médio absoluto e a raiz do erro médio quadrático também diminuem, enquanto que a partir de 0,15 m até 0,05 m o viés, o erro médio absoluto e a raiz do erro médio quadrático aumentam lentamente. Quanto ao coeficiente de correlação pode-se observar, ainda que discretamente, seu aumento ao mesmo tempo que z_0 diminui até 0,66 m. De $z_0 = 0,66$ m até $z_0 = 0,05$ m o coeficiente de correlação diminui lentamente.

Na Figura 4.9 é possível visualizar melhor o EMA e a REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso dos diferentes comprimentos de rugosidade. Fica claro o decréscimo de ambos os erros analisados até $z_0 = 0,15$ m e logo depois o leve crescimento.

Levando em consideração o conjunto de resultados apresentados, verifica-se que o

Tabela 4.10: Estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Analisando z_0

z_0	Viés	EMA	REQM	r
1,33 m	-1,76	2,24	2,73	0,6240
0,90 m	-1,37	1,99	2,47	0,6376
0,89 m	-1,36	1,98	2,47	0,6380
0,86 m	-1,33	1,96	2,45	0,6386
0,69 m	-1,11	1,86	2,33	0,6432
0,68 m	-1,10	1,85	2,32	0,6434
0,66 m	-1,07	1,84	2,31	0,6439
0,15 m	0,40	1,74	2,18	0,6372
0,13 m	0,54	1,78	2,23	0,6344
0,05 m	1,49	2,19	2,78	0,6121

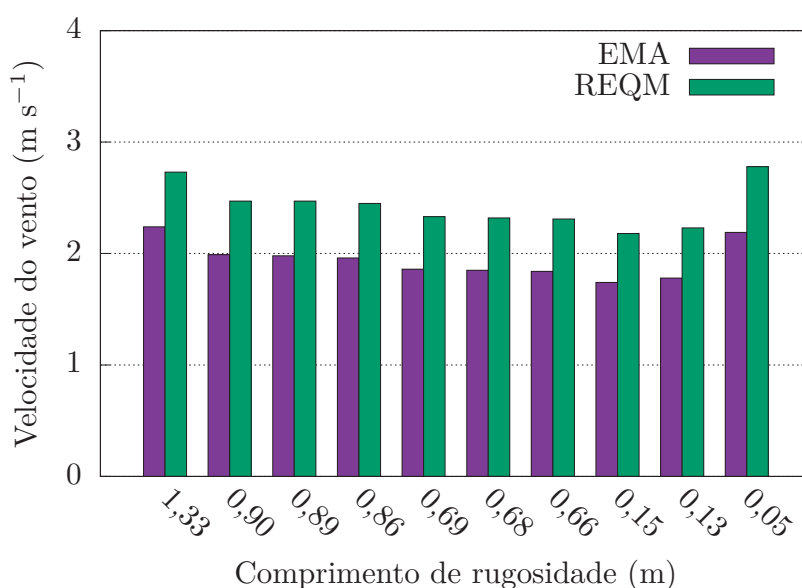


Figura 4.9: EMA e REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso de diferentes comprimentos de rugosidade — ESTUDO 3

melhor desempenho na estimativa da velocidade do vento é obtido com $z_0 = 0,15$ m. Este valor coincide com o obtido no ESTUDO 1.

Com a escolha de z_0 o próximo passo foi explorar mais o conjunto de dados verificando sua dispersão e analisando as estimativas de velocidade do vento por classes de estabilidade. Na Figura 4.10 é possível verificar os gráficos obtidos plotando a velocidade do vento observada *versus* a velocidade do vento estimada. As análises foram feitas em três conjuntos de dados e representadas nas figuras separadamente. A Figura 4.10(a) e a Figura 4.10(b) apresentam a análise feita com todos os dados das classes de estabilidade instável e estável. A Figura 4.10(c) e a Figura 4.10(d) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade estável. A Figura 4.10(e) e a Figura 4.10(f) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade instável.

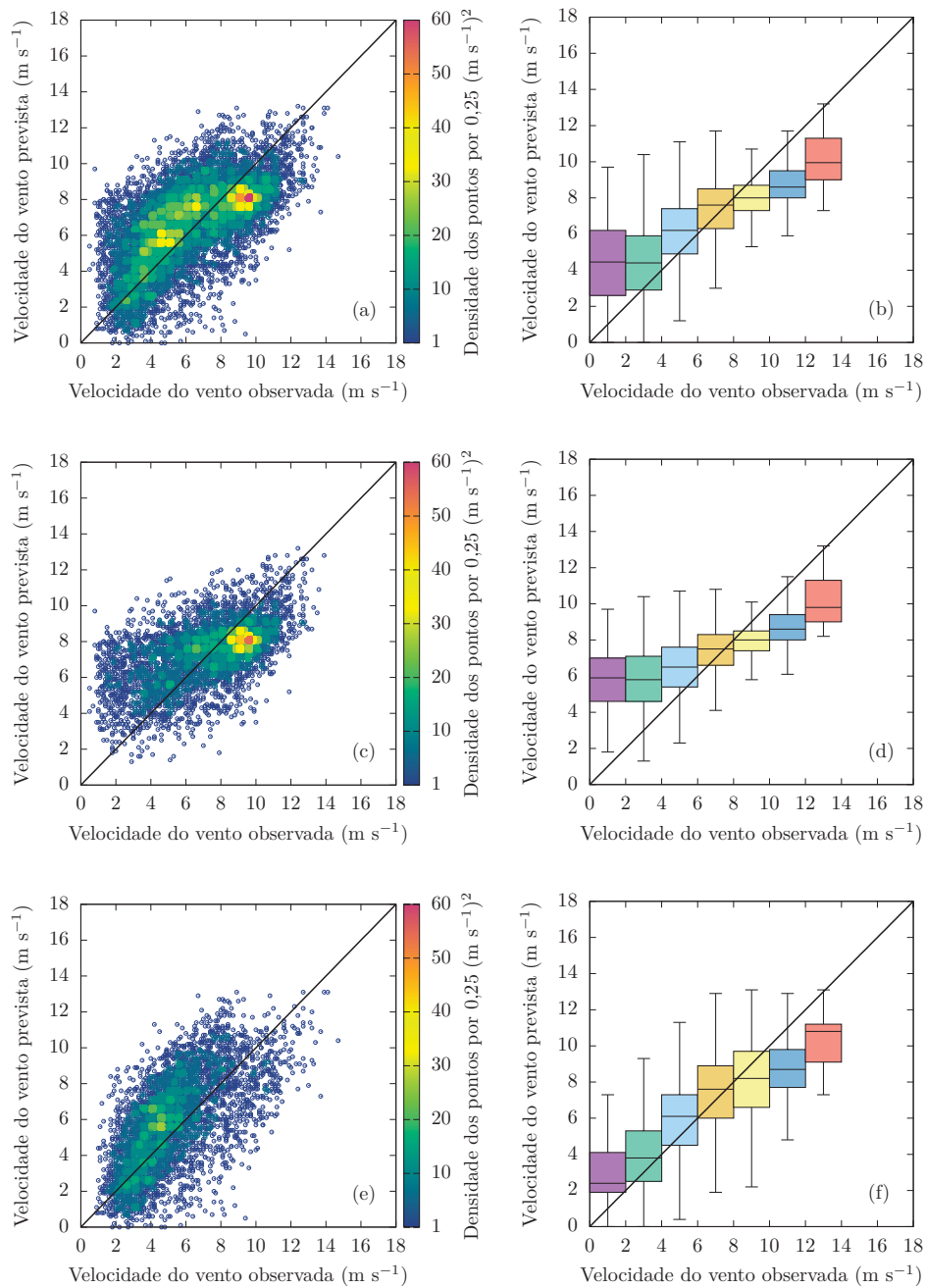


Figura 4.10: Estimativa da velocidade do vento para 50 m de altura (ESTUDO 3): (a) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).

Tabela 4.11: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Com $z_0 = 0,15 \text{ m}$

Classes de estabilidade	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.E)	σ (D.E)	\bar{x} (D.O)	σ (D.O)
Estável e Instável	0,40	1,74	2,18	0,64	6,61	2,31	6,20	2,66
Estável	0,21	1,74	2,19	0,57	7,37	1,71	7,16	2,64
Instável	0,60	1,74	2,16	0,64	5,80	2,57	5,20	2,28

Nota: Dados estimados (D.E); Dados observados (D.O).

Na Figura 4.10(a) pode-se observar a dispersão dos dados analisados. Com os *boxplots* da Figura 4.10(b) é possível verificar a ocorrência de superestimação da velocidade do vento principalmente para valores entre 0 m s^{-1} e 6 m s^{-1} . Verifica-se também uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 8 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Para a classe estável, observa-se no gráfico da Figura 4.10(c) a dispersão dos dados analisados. Com os *boxplots* da Figura 4.10(d) é possível verificar uma superestimação da velocidade do vento principalmente para valores de velocidade entre 0 m s^{-1} e 6 m s^{-1} . Verifica-se ainda uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 8 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Para a classe instável, pode-se observar a dispersão dos dados analisados no gráfico da Figura 4.10(e). Com os *boxplots* da Figura 4.10(f) é possível observar que ocorre uma superestimação principalmente para valores entre 0 m s^{-1} e 6 m s^{-1} . Observa-se ainda uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 8 m s^{-1} e 14 m s^{-1} .

Os resultados dos índices estatísticos calculados para a comparação entre os dados observacionais e as estimativas de velocidade do vento para $z_0 = 0,15 \text{ m}$ estão presentes na Tabela 4.11. Para o conjunto total de dados, verifica-se um EMA de $1,74 \text{ m s}^{-1}$, uma REQM de $2,18 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,64. Para a classe estável é possível verificar uma REQM de $2,19 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,57. Para a classe instável verifica-se um valor de $2,16 \text{ m s}^{-1}$ para a REQM e um coeficiente de correlação de 0,64. Em todos os casos o viés apresentou valores positivos com no máximo $0,60 \text{ m s}^{-1}$, indicando uma superestimação na estimativa da velocidade do vento.

Os resultados apresentados para o ESTUDO 3 contém valores de erros menores do que nos estudos anteriores para as análises da classe estável e para o conjunto total de dados. Para a classe instável o ESTUDO 2 foi o que proporcionou menores erros na estimativa da velocidade do vento. Constata-se que de maneira geral o ESTUDO 3 foi o que proporcionou melhores resultados na estimativa da velocidade do vento para os dados analisados.

4.7 Uma comparação entre os resultados de estimativas da velocidade do vento obtidos

O objetivo dessa seção é mostrar se as funções $\Psi(\zeta)$ contribuem ou não para uma melhor estimativa da velocidade do vento. A fim de evidenciar ainda mais as diferenças nos erros obtidos, foram calculados o EMA e a REQM mensalmente para as estimativas de velocidade do vento feitas nos 3 estudos anteriores.

A Tabela 4.12 contém os resultados dos cálculos estatísticos efetuados. Foram escolhidos os meses de acordo com a maior disponibilidade de dados independente do ano. Para o ESTUDO 1 verifica-se que o menor EMA é $2,18 \text{ m s}^{-1}$ e a menor REQM é $2,65 \text{ m s}^{-1}$ ocorrendo respectivamente para os meses de dezembro de 2013 e novembro de 2012. O maior EMA e a maior REQM ocorrem no mês de junho de 2012, com os valores respectivos de $3,13 \text{ m s}^{-1}$ e $3,77 \text{ m s}^{-1}$. Para o ESTUDO 2 verifica-se que o menor EMA é $1,47 \text{ m s}^{-1}$ e a menor REQM é $1,89 \text{ m s}^{-1}$, ambos para o mês de dezembro de 2013. O maior EMA é $2,30 \text{ m s}^{-1}$ e ocorre nos meses de junho e outubro de 2012 e a maior REQM é $2,77 \text{ m s}^{-1}$ e ocorre no mês de outubro de 2012. Para o ESTUDO 3 verifica-se que o menor EMA é $1,51 \text{ m s}^{-1}$ e a menor REQM é $1,92 \text{ m s}^{-1}$, ambos para o mês de abril de 2013. O maior EMA e a maior REQM ocorrem no mês de agosto de 2012, com os valores respectivos de $2,14 \text{ m s}^{-1}$ e $2,59 \text{ m s}^{-1}$.

A Figura 4.11 facilita a visualização da diferença entre a REQM obtida mensalmente para os três estudos citados. A Equação (2.11) utilizada no ESTUDO 1 apresenta os resultados com maiores valores para a REQM em todos os meses. Já a Equação (2.15) utilizada no ESTUDO 3 apresenta erros menores por um período maior de tempo do que quando se utiliza a Equação (2.18) do ESTUDO 2. Pode-se verificar claramente que os erros são sempre menores quando se utilizam as funções com a correção $\Psi(\zeta)$.

Também foi realizado um estudo sazonal para as estimativas de velocidade do vento. A Tabela 4.13 contém os resultados dos cálculos estatísticos efetuados. Para os períodos do outono, inverno e primavera o ESTUDO 3 gerou os menores erros. Para o período do verão o ESTUDO 2 foi o qual gerou os menores erros, isso pode ser devido ao fato de que este estudo apresentou melhores resultados para casos instáveis, os quais ocorrem com mais frequência no período do verão. Levando em consideração esses melhores resultados obtidos pelo ESTUDO 3 e pelo ESTUDO 2 verifica-se que os piores resultados ocorreram no período do inverno e que os melhores resultados ocorreram no período do outono. A estimativa de velocidade do vento no inverno obteve um EMA de $1,87 \text{ m s}^{-1}$, uma REQM de $2,27 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,59. A estimativa de velocidade do vento no outono obteve um EMA de $1,65 \text{ m s}^{-1}$, uma REQM de $2,10 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,65.

Tabela 4.12: EMA e REQM mensais da estimativa da velocidade do vento (m s^{-1})

Mês-Ano	ESTUDO 1		ESTUDO 2		ESTUDO 3	
	EMA	REQM	EMA	REQM	EMA	REQM
01-2014	2,66	3,13	1,59	2,02	1,85	2,29
02-2013	3,02	3,55	2,01	2,50	1,82	2,26
03-2013	2,46	2,93	1,83	2,33	1,84	2,30
04-2013	2,37	2,85	2,01	2,42	1,51	1,92
05-2013	2,52	3,06	2,10	2,62	1,78	2,24
06-2012	3,13	3,77	2,30	2,73	1,56	1,96
07-2012	2,95	3,51	2,00	2,50	1,83	2,21
08-2012	2,79	3,26	1,67	2,17	2,14	2,59
09-2012	2,99	3,48	2,12	2,59	1,65	2,01
10-2012	2,68	3,17	2,30	2,77	1,81	2,25
11-2012	2,24	2,65	1,53	1,94	1,72	2,13
12-2013	2,18	2,69	1,47	1,89	1,80	2,31

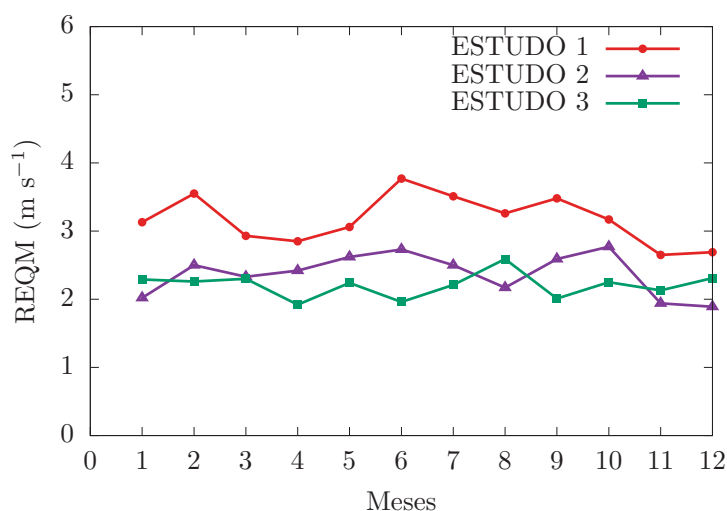


Figura 4.11: Comparação mensal da REQM na estimativa da velocidade do vento — O ESTUDO 1 utiliza a equação do perfil logarítmico (Equação (2.11)); O ESTUDO 2 utiliza a Equação (2.18); O ESTUDO 3 utiliza a Equação (2.15).

A Figura 4.12 facilita a visualização da diferença entre as REQMs obtidas sazonalmente para os três estudos realizados. A Equação (2.11) utilizada no ESTUDO 1 apresenta os resultados com maiores valores para a REQM em todas as estações do ano. A Equação (2.18) utilizada no ESTUDO 2 e a Equação (2.15) utilizada no ESTUDO 3 apresentam resultados com valores de erros bem próximos, ainda assim, as menores REQMs são geradas com o ESTUDO 3 nos períodos do outono, inverno e primavera. Destaca-se novamente que os erros são sempre menores quando se utilizam as funções com a correção $\Psi(\zeta)$, que é o caso dos ESTUDO 2 e ESTUDO 3.

Com esses resultados mostra-se a importância em utilizar as funções de estabilidade e como elas ajudam nas reduções dos erros das estimativas de velocidade do vento.

Tabela 4.13: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Análise sazonal

	Estudos	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.E)	σ (D.E)	\bar{x} (D.O)	σ (D.O)
OUTONO	ESTUDO 1	-0,96	2,58	3,16	0,32	5,02	2,46	5,98	2,69
	ESTUDO 2	-1,57	2,06	2,53	0,68	4,41	1,71	5,98	2,69
	ESTUDO 3	0,11	1,65	2,10	0,65	6,08	2,17	5,98	2,69
INVERNO	ESTUDO 1	-0,40	2,97	3,46	0,22	6,60	2,91	7,00	2,57
	ESTUDO 2	-1,33	1,92	2,41	0,62	5,68	1,76	7,00	2,57
	ESTUDO 3	0,58	1,87	2,27	0,59	7,58	2,26	7,00	2,57
PRIMAVERA	ESTUDO 1	0,01	2,39	2,88	0,49	6,03	2,87	6,02	2,86
	ESTUDO 2	-1,07	1,90	2,38	0,67	4,95	1,87	6,02	2,86
	ESTUDO 3	0,50	1,77	2,23	0,67	6,52	2,40	6,02	2,86
VERÃO	ESTUDO 1	-0,20	2,71	3,21	0,11	5,70	2,47	5,90	2,33
	ESTUDO 2	-1,12	1,75	2,23	0,58	4,78	1,66	5,90	2,33
	ESTUDO 3	0,68	1,81	2,26	0,54	6,58	2,13	5,90	2,33

Nota: Dados estimados (D.E); Dados observados (D.O).

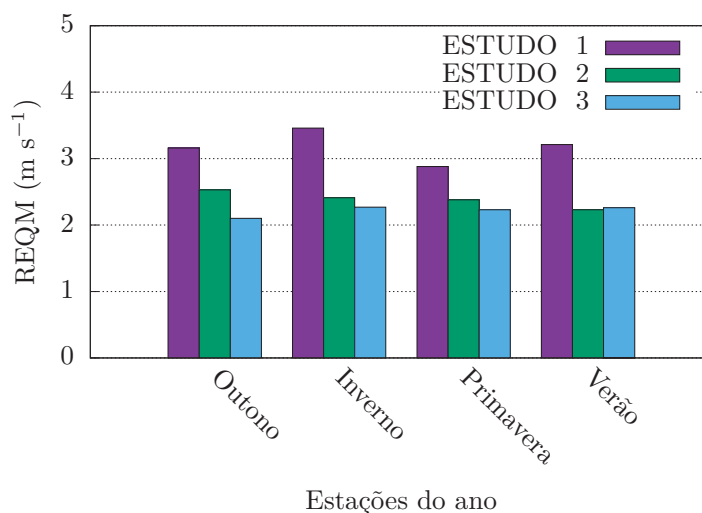


Figura 4.12: Comparação sazonal da REQM na estimativa da velocidade do vento — O ESTUDO 1 utiliza a equação do perfil logarítmico (Equação (2.11)); O ESTUDO 2 utiliza a Equação (2.18); O ESTUDO 3 utiliza a Equação (2.15).

4.8 Estimativa da velocidade do vento para a altura de 100 m

Nesta seção é apresentada uma análise da velocidade do vento para a altura de 100 m. Esta análise foi realizada utilizando as formulações do ESTUDO 3 devido ao fato de ele ter apresentado bons resultados para o estudo de estimativa de velocidade do vento a 50 m de altura. Esta análise foi baseada na Equação (2.15) a qual aplicada para a velocidade do vento a 100 m de altura fica

$$\bar{u}_{100} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{100}}{z_0} \right) - \Psi(\zeta_{100}) \right],$$

onde \bar{u}_{100} é a velocidade média do vento que será estimada para a altura de 100 m, u_* é a velocidade de atrito obtida através dos dados de reanálise e de dados da TORRE P1, $k = 0,4$ é a constante de von Kármán, z_{100} representa a altura de 100 m para a qual será estimada a velocidade do vento, z_0 é o comprimento de rugosidade, ζ_{100} é a variável adimensional de estabilidade de Monin-Obukhov para a altura de 100 m (também obtida através dos dados de reanálise e de dados da TORRE P1) e Ψ é a função da estabilidade atmosférica que depende de ζ . É importante salientar que neste estudo não foram utilizados dados de velocidade do vento a 10 m de altura.

Para a escolha do valor do comprimento de rugosidade a ser utilizado foi feita uma comparação da estimativa da velocidade do vento utilizando os valores de z_0 obtidos na Seção 4.3. Os resultados dos índices estatísticos calculados podem ser observados na Tabela 4.14. É possível verificar que o viés decresce (em módulo) enquanto z_0 diminui até 0,15 m. Verifica-se que quando o valor de z_0 diminui de 1,33 m até 0,66 m o erro médio absoluto também diminui e a partir de $z_0 = 0,66$ m até $z_0 = 0,05$ m o erro médio absoluto aumenta lentamente. Vale destacar que de $z_0 = 0,69$ m até $z_0 = 0,15$ m o EMA é praticamente o mesmo, variando no máximo $0,02 \text{ m s}^{-1}$. É fácil perceber que quando o valor de z_0 diminui de 1,33 m até 0,15 m a raiz do erro quadrático médio também diminui, enquanto que a partir de 0,15 m até 0,05 m a raiz do erro médio quadrático aumenta. Vale destacar que de $z_0 = 0,69$ m até $z_0 = 0,15$ m a REQM é praticamente a mesma, variando no máximo $0,01 \text{ m s}^{-1}$. Quanto ao coeficiente de correlação pode-se observar, ainda que discretamente, seu aumento ao mesmo tempo que z_0 diminui até 0,15 m. De $z_0 = 0,15$ m até $z_0 = 0,05$ m o coeficiente de correlação diminui lentamente.

Na Figura 4.13 é possível visualizar melhor o EMA e a REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso dos diferentes comprimentos de rugosidade. Percebe-se o decrescimento de ambos os erros analisados até $z_0 = 0,69$ m, de $z_0 = 0,69$ m até $z_0 = 0,15$ m os erros (EMA e REQM) se mantêm praticamente os mesmos para esses comprimentos de rugosidade e logo depois percebe-se o leve crescimento do valor de ambos os erros.

Como os erros são semelhantes para quatro comprimentos de rugosidade, levando em

Tabela 4.14: Estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Analisando z_0

z_0	Viés	EMA	REQM	r
1,33 m	-1,47	2,29	2,88	0,6793
0,90 m	-1,08	2,09	2,66	0,6900
0,89 m	-1,07	2,09	2,66	0,6905
0,86 m	-1,04	2,07	2,64	0,6911
0,69 m	-0,82	1,99	2,55	0,6958
0,68 m	-0,81	1,99	2,55	0,6959
0,66 m	-0,78	1,98	2,54	0,6964
0,15 m	0,69	2,00	2,54	0,7016
0,13 m	0,83	2,04	2,60	0,7000
0,05 m	1,78	2,50	3,14	0,6855

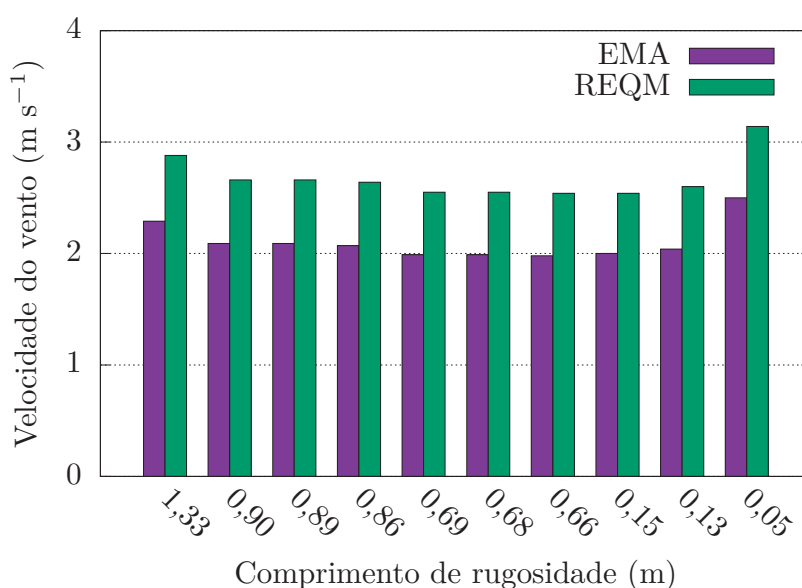


Figura 4.13: EMA e REQM da estimativa de velocidade do vento com o uso de diferentes comprimentos de rugosidade

consideração o conjunto de resultados apresentados optou-se por utilizar $z_0 = 0,15$ m.

Com a escolha de z_0 o próximo passo foi explorar mais o conjunto de dados verificando sua dispersão e analisando as estimativas por classes de estabilidade. Na Figura 4.14 é possível verificar os gráficos obtidos plotando a velocidade do vento observada *versus* a velocidade do vento estimada. As novas análises foram feitas em três conjuntos de dados e representadas nas figuras separadamente. A Figura 4.14(a) e a Figura 4.14(b) apresentam a análise feita com todos os dados das classes de estabilidade instável e estável. A Figura 4.14(c) e a Figura 4.14(d) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade estável. A Figura 4.14(e) e a Figura 4.14(f) apresentam a análise feita apenas com os dados da classe de estabilidade instável.

Na Figura 4.14(a) observa-se a dispersão dos dados analisados. Com os *boxplots* da

Tabela 4.15: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Com $z_0 = 0,15 \text{ m}$

Classes de estabilidade	Viés	EMA	REQM	r	\bar{x} (D.E)	σ (D.E)	\bar{x} (D.O)	σ (D.O)
Estável e Instável	0,69	2,00	2,54	0,70	7,92	2,99	7,22	3,30
Estavel	0,75	2,06	2,66	0,60	9,51	2,18	8,76	3,19
Instavel	0,63	1,93	2,41	0,63	6,24	2,79	5,61	2,56

Nota: Dados estimados (D.E); Dados observados (D.O).

Figura 4.14(b) é possível verificar uma tendência de superestimação e subestimação para alguns valores da velocidade do vento. A superestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 0 m s^{-1} e 10 m s^{-1} . A subestimação ocorre principalmente para valores de velocidade do vento entre 10 m s^{-1} e 16 m s^{-1} .

Para a classe estável, observa-se na Figura 4.14(c) a dispersão dos dados analisados. Com os *boxplots* da Figura 4.14(d) verifica-se uma superestimação da velocidade do vento principalmente para valores entre 0 m s^{-1} e 10 m s^{-1} . Também é possível verificar uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 10 m s^{-1} e 16 m s^{-1} .

A dispersão dos dados analisados da classe instável pode ser observada na Figura 4.14(e). Com os *boxplots* da Figura 4.14(f) verifica-se a ocorrência de valores de velocidade do vento superestimados principalmente entre 0 m s^{-1} e 8 m s^{-1} . Também verifica-se uma subestimação principalmente para valores de velocidade do vento entre 10 m s^{-1} e 16 m s^{-1} .

Os resultados dos índices estatísticos calculados para a comparação entre os dados observacionais e as estimativas de velocidade do vento utilizando a Equação (2.15) com $z_0 = 0,15 \text{ m}$ estão presentes na Tabela 4.15. Para o conjunto total de dados, verifica-se um EMA de $2,00 \text{ m s}^{-1}$, uma REQM de $2,54 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,70. Observa-se na classe estável um desvio padrão menor nos dados estimados do que nos dados observacionais; verifica-se ainda uma REQM de $2,66 \text{ m s}^{-1}$ e um coeficiente de correlação de 0,60. Para a classe instável verifica-se um desvio padrão maior nos dados estimados do que nos dados observacionais; observa-se também um valor de $2,41 \text{ m s}^{-1}$ para a REQM e um coeficiente de correlação de 0,63. Em todos os casos o viés apresentou valores positivos indicando uma superestimação na estimativa da velocidade do vento.

Considerando o conjunto de resultados apresentados, vê-se claramente que o melhor resultado de estimativa de velocidade do vento se deu para a classe instável. Destaca-se que para a estimativa da velocidade do vento a 100 m de altura os resultados obtidos são basicamente os mesmos em relação as estimativas de velocidade do vento para 50 m de altura. Verificou-se um aumento do EMA de no máximo $0,32 \text{ m s}^{-1}$, um aumento da REQM de no máximo $0,47 \text{ m s}^{-1}$ e o coeficiente de correlação em relação ao conjunto total de dados analisados apresentou um resultado melhor.

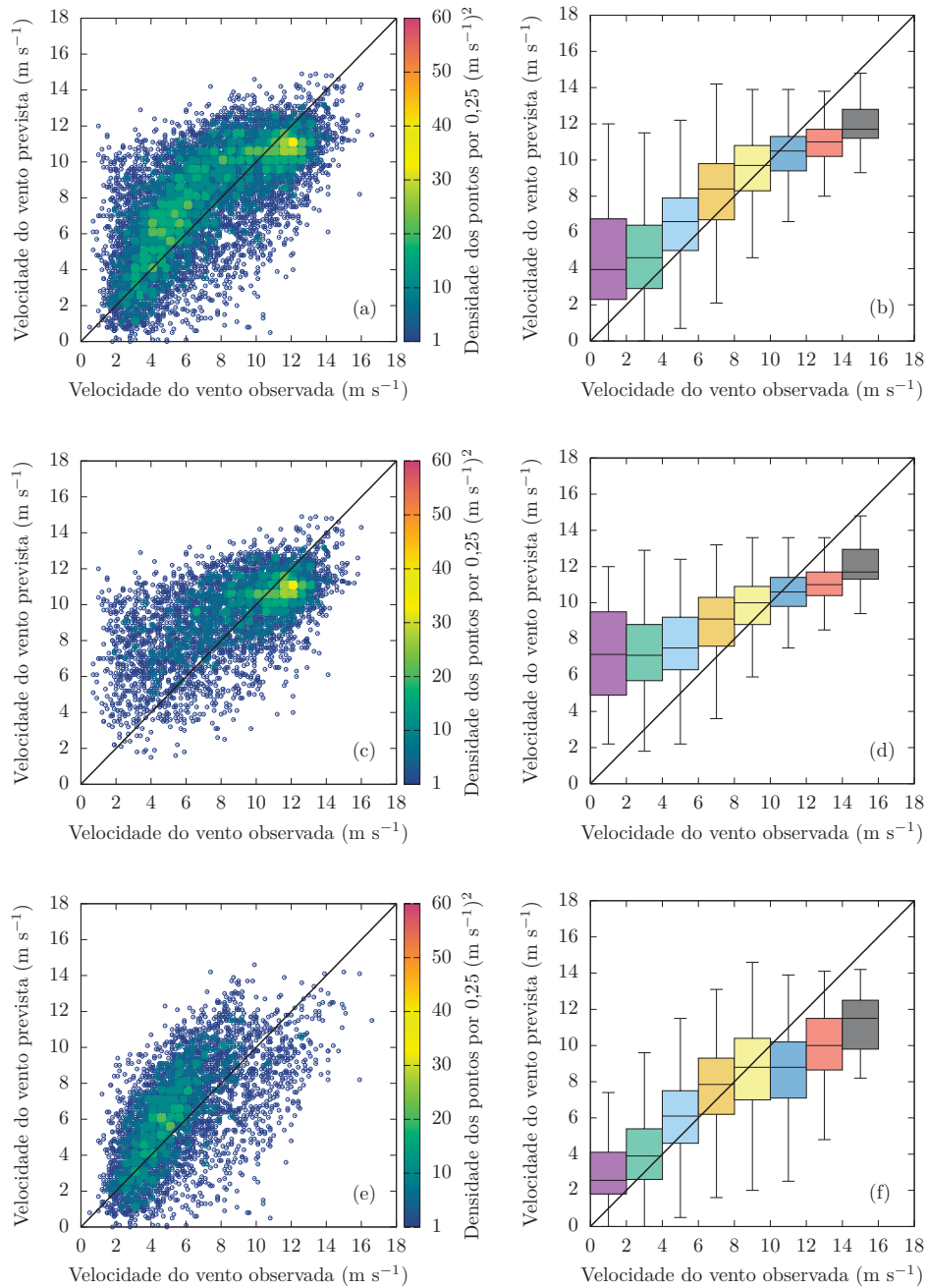


Figura 4.14: Estimativa da velocidade do vento para 100 m de altura: (a) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (b) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados das classes instável e estável); (c) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (d) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe estável); (e) dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável); (f) *boxplots* dos dados observados *versus* dados estimados (contempla todos os dados da classe instável).

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

Neste trabalho o objetivo foi avaliar o desempenho de modelos de extrapolação vertical da velocidade do vento. Essa avaliação é importante em estudos de geração de energia eólica para prognósticos de locais viáveis ou não para implementação de parques eólicos. Para alcançar o objetivo foi necessário avaliar o desempenho de séries de dados de reanálise dos modelos CFSR/CFSV2 vindos dos NCEP/NCAR. O estudo foi realizado para o estado de Minas Gerais verificando-se a possível utilização desses dados de reanálise na ausência de dados observacionais de velocidade do vento e temperatura do ar.

Os resultados da análise dos dados de temperatura do ar indicaram que os dados de reanálise dos modelos citados apresentaram um bom desempenho em relação aos dados observados de estações automáticas da rede Cemig, com coeficiente de correlação médio em torno de 0,85 e com REQM médio em torno de 2,79 °C. Com a análise pode-se concluir que esses dados apresentam potencial para serem utilizados como fonte alternativa em locais com ausência de estações ou de séries longas de dados meteorológicos. Já os dados de velocidade do vento das reanálises não reproduziram a variabilidade apresentada pelas estações automáticas. O coeficiente de correlação médio encontrado foi de 0,39 e a REQM média em torno de 1,38 m s⁻¹. Esse erro pode ser visto como um erro aceitável considerando o fato de que os modelos da reanálise têm resolução horizontal de aproximadamente 38 km (CFSV) ou 22 km (CFSV2). Apenas com os resultados provenientes desse estudo não se pode tirar conclusões definitivas sobre essas fontes de dados; para isso, estudos com mais estações meteorológicas em diferentes localidades e com diferentes períodos de dados devem ser realizados.

Com dados de reanálise do modelo CFSV2 e com dados medidos em uma torre localizada no município de Bocaiuva em Minas Gerais, foi possível estimar a velocidade do vento em níveis superiores a 10 m. Essas velocidades estimadas foram comparadas com as medições reais obtidas na torre citada.

Um parâmetro importante que normalmente aparece quando se trata de estimativa da velocidade do vento é o comprimento de rugosidade. Dentre os valores calculados, o que proporcionou melhores resultados para o local da torre citada foi $z_0 = 0,15$ m.

Quanto às estimativas da velocidade do vento, foi analisado o perfil logarítmico e mais dois métodos de estimativa que utilizam funções de correção de estabilidade baseadas na Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov. Os resultados dos estudos mostram que a estimativa da velocidade para a altura de 50 m com o perfil logarítmico gerou uma REQM de $3,22 \text{ m s}^{-1}$ para o conjunto total de dados analisados e um coeficiente de correlação de 0,30. A melhor estimativa com função de correção de estabilidade gerou uma REQM de $2,18 \text{ m s}^{-1}$ para o conjunto total de dados analisados e um coeficiente de correlação de 0,64. Uma comparação entre os três métodos de estimativa utilizados, mostrando os cálculos mensais da REQM, indicou que em todos os casos os erros produzidos pela função logarítmica são maiores do que quando se utilizam funções com correção de estabilidade.

Destaca-se que a estimativa da velocidade do vento para a altura de 100 m segue o mesmo padrão do que a estimativa da velocidade do vento para a altura de 50 m. Os resultados obtidos são basicamente os mesmos, com um pequeno aumento nos erros que não ultrapassou $0,47 \text{ m s}^{-1}$ para os dados analisados.

O presente trabalho foi muito importante para compreender a necessidade de usar funções de correção de estabilidade na estimativa da velocidade do vento. A redução dos erros é bem evidente. Também foi possível perceber a dificuldade em encontrar bases de dados meteorológicos completas, indicando ainda mais a necessidade de estudo e produção de fontes alternativas com boa qualidade.

Em trabalhos futuros, a exploração de funções de correção de estabilidade pode ser mais aprofundada, podendo ser geradas novas formulações que se adaptem melhor aos dados. Novos estudos com dados em diversas localizações podem ser testados e comparados para validar a influência da estabilidade atmosférica. Também seria interessante a observação e estudo das variáveis meteorológicas que interferem na estimativa da velocidade do vento, com o objetivo de analisar outras possíveis influências. Podem ser feitas análises para outros níveis de medição e além das estatísticas básicas usar funções de distribuição de probabilidade, que são modelos de interesse na área de produção de energia eólica. Além disso, é possível realizar novos estudos com as funções de correção de estabilidade para verificar a potência de futuros aerogeradores. Por fim, é necessário salientar a importância de se investir em novas pesquisas na área, principalmente em métodos de extrapolar a velocidade do vento para que as análises de produção de energia eólica sejam mais acuradas oferecendo mais segurança aos investidores.

REFERÊNCIAS

- Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., e de Sá, A. L. (2001). Atlas do potencial eólico brasileiro. Recuperado em http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf em 23/06/2016.
- Amarante, O. A. C., de Jesus Lima da Silva, F., e de Andrade, P. E. P. (2010). Atlas eólico - Minas Gerais. Recuperado em http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas%20eolico%20MG.pdf em 23/06/2016.
- ANEEL (2008). *Atlas de energia eléctrica do Brasil*. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 3ª edição.
- Barthelmie, R. J., J. P. Palutikof, J., e Davies, T. D. (1993). Estimation of sector roughness lengths and the effect on prediction of the vertical wind speed profile. *Boundary-Layer Meteorology*, páginas 19–47.
- Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, I., e Bradley, E. F. (1971). Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, páginas 181–189.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., e Santos, C. S. (2014). WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. *Elsevier*, páginas 116–126.
- Cheng, Y. e Brutsaert, W. (2005). Flux-profile relationships for wind speed and temperature in the stable Atmospheric Boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, páginas 519–538.
- Dias, N. L. (2017). Notas de micrometeorologia. 133 páginas.
- Dyer, A. J. (1974). A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorology*, páginas 363–372.

Grachev, A. A., Andreas, E. L., Fairall, C. W., Guest, P. S., e Persson, P. O. G. (2007). SHEBA flux-profile relationships in the stable atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol*, páginas 315–333.

Hansen, F. V. (1993). Surface Roughness Lengths. páginas 0–51.

Högström, U. (1988). Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layers: A re-evaluation. *Boundary-Layer Meteorology*, páginas 55–78.

Islam, M. S., Mohandes, M., e Rehman, S. (2016). Vertical extrapolation of wind speed using artificial neural network hybrid system. *Neural Computing and Applications*, páginas 2351–2361.

Kader, B. A. e Yaglom, A. M. (1990). Mean fields and fluctuation moments in unstably stratified turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 212:637–662.

Kaimal, J. C. e Finnigan, J. J. (1994). *Atmospheric Boundary Layer Flows their Structure and Measurement: Their Structure and Measurement*. Oxford University Press. 289 páginas.

Kaiser-Weiss, A. K., Kaspar, F., Heene, V., Borsche, M., Tan, D. G. H., Poli, P., Obregon, A., e Gregow, H. (2015). Comparison of regional and global reanalysis near-surface winds with station observations over Germany. *Advances in Science and Research*, 12:187–198.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., L. Gandin, M. I., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., e Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *American Meteorological Society*, páginas 437–472.

Maggiotto, S. R., Dias, N. L., Vissotto, S., Prevedello, C. L., e Nascimento, E. L. (2007). Diretrizes para redes automáticas e telemétricas de superfície. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12:225–240.

Mariano, E. B., Cavalcanti, E. P., e Beserra, E. A. (2017). Análise comparativa da velocidade do vento simulado pelo BRAMS com dados observados e de reanálises. *Revista Brasileira de Meteorologia*, páginas 269–276.

Martins, F. R., Guarnieri, R. A., e Pereira, E. B. (2008). O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30:1304.1–1304.13.

Monin, A. e Obukhov, A. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geophysiz*, páginas 163–187.

Moraes, O. L. L., Fitzjarrald, D. R., Acevedo, O. C., Sakai, R. K., Czikowsky, M. J., e Degrazia, G. A. (2008). Comparing spectra and cospectra of turbulence over different surface boundary conditions. *Elsevier*, páginas 4927–4939.

Newman, J. F. e Klein, P. M. (2014). The impacts of atmospheric stability on the accuracy of wind speed extrapolation methods. *Resources*, páginas 81–105.

Reynolds, O. (1894). On the dynamical theory of turbulent incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Proceedings of the Royal Society of London*, páginas 123–164.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Delst, P. V., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Dool, H. V. D., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G., e Goldberg, M. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8):1015–1057.

Saldanha, C. B., Radin, B., Cardoso, M. A. G., Rippel, M. L., Fonseca, L. L. D., e Rodriguez, F. (2015). Comparação dos dados de precipitação gerados pelo gpcp vs observados para o estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, páginas 415–422.

Stüker, E., Schuster, C. H., Schuster, J. J., Santos, D. C., Medeiros, L. E., Costa, F. D., e e Franciano Scremin Puhales, G. D. (2016). Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. *Ciência e Natura*, páginas 284–290.

Stull, R. B. (1988). *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Norwel. 666 páginas.

Vieira, C. F. A., dos Santos, C. C., de Lima, F. J. L., Magalhães, R. A., e da Silva, E. M. (2006). Avaliação dos dados de vento gerados no projeto reanalysis do NCEP/NCAR para futuras aplicações no cálculo do potencial eólico em regiões do estado do Ceará. *Rev. Tecnol. Fortaleza*, 27:190–194.

Wieringa, J. (1980). A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorology*, páginas 411–430.

Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, volume 91 de *Internacional Geophysics Series*. Academic Press, 2ª edição. 648 páginas.

Zilitinkevich, S. S., Grachev, A. A., e Fairall, C. W. (2001). Notes and correspondence: Scaling reasoning and field data on the sea surface roughness lengths for scalars. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58:320–325.

Apêndice A

Justificativa para a escolha dos dados de velocidade do vento a 10 m de altura

Na TORRE P1, a qual faz parte do estudo em questão, não existe medição do vento a 10 metros de altura. Portanto, foi necessário optar pelo uso de outra fonte de dados de velocidade do vento a 10 metros de altura; assim, foi feita uma análise com cinco conjuntos de dados. Foram comparados os desempenhos das séries de dados da reanálise; dados gerados por interpolação dos dados disponíveis das estações de superfície com medições da velocidade do vento a 10 metros de altura; também foram utilizados dados das três estações de superfície mais próximas a TORRE P1: Buritizeiro, SE Diamantina e SE Montes Claros. As distâncias dessas três estações em relação a torre P1 são de aproximadamente 118 km, 100 km e 78 km respectivamente.

Foi feita uma redução dos dados disponíveis até que todos os conjuntos tivessem o mesmo período de dados, totalizando 8.527 dados para cada um. As datas e horários são iguais para todos os conjuntos. A análise baseou-se na estimativa da velocidade do vento, qual conjunto apresentasse melhor desempenho seria utilizado nas avaliações deste trabalho.

Para calcular a estimativa da velocidade do vento foram utilizados dois métodos. Primeiramente foi utilizada a equação

$$\bar{u}_{i+h} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_{i+h}}{z_i} \right) - \Psi(\zeta_{i+h}) + \Psi(\zeta_i) \right] + \bar{u}_i, \quad (\text{A.1})$$

onde o índice i indica a altura z em metros e $h > 0$ implica em $i + h > i$, ou seja, $i + h$ indica uma altura maior do que i . A função da estabilidade atmosférica $\Psi(\zeta)$ é dada por

$$\Psi(\zeta) = \int \frac{1 - \phi_\tau}{\zeta} d\zeta, \quad (\text{A.2})$$

e ϕ_τ é a função adimensional do gradiente de velocidade do vento que depende da estabilidade atmosférica. Para condições instáveis ($\zeta < 0$) foi utilizada a relação sugerida por

Tabela A.1: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Equação (A.1)

Classes zeta	Viés	EMA	REQM	Coef. Correlação
Reanálise	-1,27	1,87	2,36	0,66
Interpolação	-1,74	2,15	2,79	0,56
Buritizeiro	-1,33	2,18	2,83	0,41
SE Diamantina	-1,25	2,11	2,75	0,41
SE Montes Claros	-2,41	2,64	3,35	0,47

Businger-Dyer

$$\phi_\tau = (1 - 16\zeta)^{-\frac{1}{4}}, \quad (\text{A.3})$$

e para condições estáveis ($\zeta > 0$) foi utilizada a relação sugerida por Cheng e Brutsaert

$$\phi_\tau = 1 + s \left(\frac{\zeta + \zeta^m (1 + \zeta^m)^{\frac{1-m}{m}}}{\zeta + (1 + \zeta^m)^{\frac{1}{m}}} \right), \quad (\text{A.4})$$

onde os autores sugerem $s = 6,1$ e $m = 2,5$.

Utilizando a Equação (A.1) foi calculada a estimativa da velocidade do vento para 50 metros de altura utilizando dados de velocidade do vento a 10 metros de altura. Na Tabela A.1 é possível verificar os resultados obtidos através dos cálculos estatísticos. O menor viés em módulo se deu para os dados de SE Diamantina e o segundo menor foi para os dados de reanálise. Verifica-se que o menor EMA ($1,87 \text{ m s}^{-1}$), a menor REQM ($2,36 \text{ m s}^{-1}$) e o maior coeficiente de correlação (0,61) foram todos obtidos utilizando os dados de reanálise. Pode-se concluir que o conjunto de dados de velocidade do vento a 10 metros de altura da reanálise teve um melhor desempenho na estimativa da velocidade do vento. Isso pode ser devido ao fato de que elementos importantes no método de estimar a velocidade do vento (velocidade de atrito (u_*), fluxo de momentum (τ) e fluxo de calor sensível na superfície (H)) vêm de dados da reanálise.

O segundo método para fazer a estimativa da velocidade do vento foi com o uso da fórmula da Lei de Potência que pode ser encontrada, por exemplo, em Islam et al. ((2016))

$$\bar{u}_{i+h} = \bar{u}_i \left(\frac{z_{i+h}}{z_i} \right)^{1/7}. \quad (\text{A.5})$$

Utilizando a Equação (A.5) foi possível fazer novas estimativas da velocidade do vento para 50 m de altura utilizando dados de velocidade do vento a 10 metros de altura. Na Tabela A.2 é possível verificar os resultados dos índices estatísticos calculados para a comparação entre os dados. Verifica-se novamente que os dados da reanálise podem proporcionar melhores resultados. O menor viés em módulo se deu para SE Diamantina e o segundo menor foi para a reanálise. Verifica-se que o menor EMA ($2,90 \text{ m s}^{-1}$), a menor REQM

Tabela A.2: Estatísticas com os dados de estimativa da velocidade do vento (m s^{-1}) — Equação (A.5)

Classes zeta	Viés	EMA	REQM	Coef. Correlação
Reanálise	-2,77	2,90	3,60	0,48
Interpolação	-3,36	3,45	4,31	0,08
Buritizeiro	-2,84	3,29	4,21	0,06
SE Diamantina	-2,75	3,20	4,10	-0,02
SE Montes Claros	-4,20	4,24	5,15	-0,01

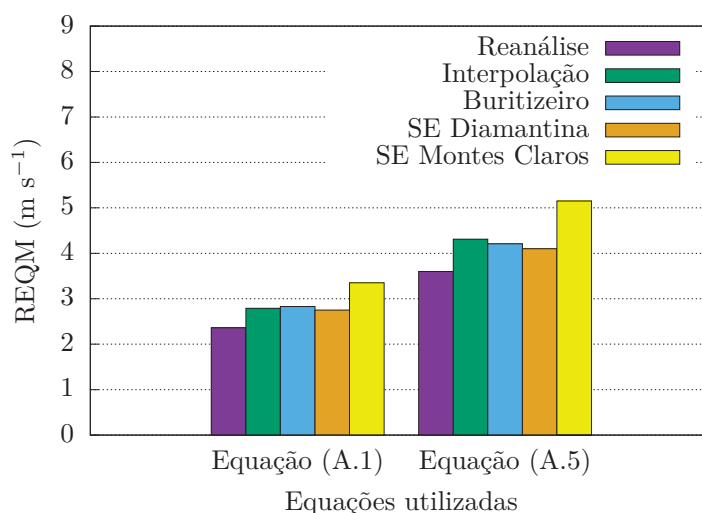


Figura A.1: Comparação entre as REQMs obtidas nas estimativas de velocidade do vento

($3,60 \text{ m s}^{-1}$) e o maior coeficiente de correlação (0,48) foram todos obtidos utilizando os dados de reanálise.

Na Figura A.1 pode-se observar os valores das REQMs para os dois métodos utilizados e para cada uma das fontes de dados. Vê-se claramente que os dados da reanálise apresentam erros menores em todos os casos. Deve-se destacar que o método que utiliza correção de estabilidade proporcionou erros bem menores.

Considerando o conjunto de resultados apresentados, optou-se por utilizar os dados de velocidade do vento de 10 metros de altura vindos da reanálise. A utilização desses dados pode proporcionar melhores resultados na estimativa da velocidade do vento.

Apêndice B

Processamento de dados vindos da reanálise

O processamento de dados consiste em executar atividades ordenadamente, com o objetivo de produzir e organizar informações a partir de outras obtidas inicialmente. A fase de coleta e organização dos dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) teve início com um cadastro no sítio <https://rda.ucar.edu/> para poder solicitar os dados.

Os dados de reanálise dos NCEP/NCAR estão disponíveis para todo o mundo. Porém, optou-se por fazer um recorte de Minas Gerais a fim de analisar apenas a região de interesse. O recorte está limitado às latitudes de -14° a -23° e longitudes de -39° a -52° .

Os dados de reanálise utilizados nas análises foram o fluxo de momentum (τ), fluxo de calor sensível na superfície (H), comprimento de rugosidade (z_0), temperatura do ar e velocidade do vento.

Após solicitar e baixar os arquivos contendo os dados do modelo CFSR e CFSV2 foi realizada uma análise para verificar, separar e organizar o conteúdo de cada arquivo. Cada arquivo obtido, no formato NETCDF, possui um nome do tipo

`nomedoarquivo.gdas.ano+mes.grb2.nc`

ou

`nomedoarquivo.cdas1.ano+mes.grb2.nc,`

onde “nomedoarquivo” refere-se ao nome das variáveis de interesse.

Para o estudo em questão, utilizando como base as células da grade dos dados de reanálise, foi calculado um valor para cada ponto de estudo (cada local de estação meteorológica selecionada). Para isso foi utilizada interpolação bilinear que é uma técnica para calcular valores de uma localização de grade com base em pontos de grade próximos. Essa técnica atribui um valor ao ponto de interesse tomando a média ponderada dos quatro pontos mais próximos a ele. Aplicam-se pesos com base na distância dos quatro pontos de grades mais próximos.

Para o processamento dos dados de reanálise foi utilizada a linguagem de programação Python. Os pacotes utilizados foram *argparse*, *datetime*, *math*, *numpy*, *scipy*, *matplotlib* e *basemap*.